

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ  
ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ  
ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΙΑΜΕΛΙΣΜΟΥ (PARTITIONING)**

**ΑΝΤΩΝΗΣ ΜΟΥΡΤΖΑΝΟΣ**



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2005



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ**  
**ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.:	4836/1
Ημερ. Εισ.:	17-07-2006
Δωρεά:	Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός:	ΠΤ - ΜΜΒ
	2005
	ΜΟΥ

© Αντώνης Μουρτζανός

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## **Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής     Δρ. Γεώργιος Πετρόπουλος  
(Επιβλέπων)            Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
                                  Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής   Δρ. Γεώργιος Λυμπερόπουλος  
                                  Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
                                  Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής     Δρ. Κων/νος Πανταζάρας  
                                  Διδάσκων, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,  
                                  Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, κ. Γεώργιο Πετρόπουλο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμον στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, κ. Γεώργιο Λυμπερόπουλο και κ. Κων/νο Πανταζάρα για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Ευχαριστώ τον κ. Αθανάσιο Βέργο για τη συμβολή του στη χρήση του εργαστηριακού τόρνου. Επίσης ευχαριστώ τους φίλους μου Ξηροπαΐδη Άγγελο, Σιαμπαλή Διονύση, Δάλλα Πέτρο, Γιαννόπουλο Κων/νο, Ηλιόπουλο Σπήλιο και Δανέλλη Βασίλη για τη συνδρομή τους και την πολύτιμη υποστήριξή τους. Ευχαριστώ πολύ την Όλγα Βαρακλιώτου για την υποστήριξή της. Πάνω απ' όλα είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Αργυρή Μουρτζανού και Κωνσταντίνο Μουρτζανό, για την συμπαράσταση, υποστήριξη και αγάπη όλα αυτά τα χρόνια. Την εργασία θα ήθελα να την αφιερώσω στον αδερφό μου Νίκο Μουρτζανό.

Αντώνης Μουρτζανός



# **ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΙΑΜΕΛΙΣΜΟΥ (PARTITIONING)**

ΑΝΤΩΝΗΣ ΜΟΥΡΤΖΑΝΟΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2003

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γεώργιος Πετρόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής

## **Περίληψη**

Η βελτιστοποίηση είναι μία τόσο σύγχρονη όσο και διαχρονική έννοια που καθορίζει πλέον όλες τις τεχνολογικές δραστηριότητες της εποχής μας με απώτερο σκοπό στις περισσότερες των περιπτώσεων τον βέλτιστο συνδυασμό ευνοϊκών οικονομικών μεγεθών με την παραγωγή ποιοτικών προϊόντων. Οι μαθηματικές μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για να βελτιστοποιηθούν διάφορες συναρτήσεις είναι πολλές και συνήθως προσαρμόζονται στη φύση του προβλήματος που τίθεται προς βελτιστοποίηση. Το σύστημα κατεργασία – εργαλειομηχανή προσφέρει ένα πολυδιάστατο πρόβλημα προς μελέτη καθώς η ανάλυση του εμπλέκει διαφορετικά επιστημονικά πεδία. Η μέθοδος του διαμελισμού (partitioning) που χρησιμοποιείται εδώ μας προσφέρει τα εφόδια για να αντιμετωπίσουμε προβλήματα τέτοιου είδους.

Αρχικά γίνεται μια πρώτη γνωριμία με το μηχανουργικό σύστημα. Συγκεκριμένα βλέπουμε πως υπολογίζεται η αξιοπιστία και ο χρόνος ζωής της εργαλειομηχανής λαμβάνοντας υπόψη τη φθορά, αναφέρουμε ορισμένες βασικές έννοιες για την κατεργασία όπως οι παράγοντες και οι συνθήκες κοπής και μελετάμε τη διαδικασία βελτιστοποίησης της κατεργασίας. Στη συνέχεια, περιγράφεται η μέθοδος του διαμελισμού και τα στάδια που ακολουθούμε καθώς και πως εφαρμόζεται στο σύστημα κατεργασία- εργαλειομηχανή με δύο διαφορετικούς τρόπους. Γίνεται ανάλυση της απόδοσης βάσει των δεδομένων και τέλος παρουσιάζεται ένα υπόδειγμα στατιστικής διασταύρωσης ενός θεωρητικού μοντέλου με πειραματικά δεδομένα.

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	5 -
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5 -
1.1 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	5 -
1.2 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	7 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	8 -
2.1 ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗΣ.....	8 -
2.2.1 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ .....	12 -
2.2.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΚΟΠΗΣ.....	12 -
2.2.3 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	13 -
2.2.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΟΠΗΣ .....	16 -
2.2.4.1 Εισαγωγή .....	16 -
2.2.4.2 Βασικές έννοιες και ορισμοί .....	16 -
2.2.4.3 Βελτιστοποίηση συστήματος κοπής μιας βαθμίδας.....	17 -
2.2.4.3.1 Επιλογή πρόωσης.....	18 -
2.2.4.3.2 Επιλογή ταχύτητας κοπής .....	18 -
2.2.4.3.3 Διάρκεια ζωής κοπτικού για ελάχιστο κόστος και ελάχιστο χρόνο.....	23 -
2.2.4.3.4 Εκτίμηση των άλλων παραγόντων κοπής ( $M$ , $C$ ) .....	24 -
2.2.3.5 Κοπή μέγιστης απόδοσης .....	26 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	27 -
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΙΑΜΕΛΙΣΜΟΥ (PARTITIONING) ...	27 -
3.1.1 ΙΕΡΑΡΧΙΚΗ ΔΟΜΗ .....	27 -
3.1.2 ΜΗ-ΙΕΡΑΡΧΙΚΗ ΔΟΜΗ .....	29 -
3.1.3 ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....	30 -
3.1.4 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΔΙΑΜΕΛΙΣΜΟΥ (PARTITIONING) .....	33 -
3.1.5 ΠΡΩΤΗ ΦΑΣΗ: ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ .....	36 -
3.1.6 ΔΕΥΤΕΡΗ ΦΑΣΗ: ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΜΕΛΙΣΜΟΣ.....	73 -
3.1.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ.....	76 -
3.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΜΕΛΙΣΜΟΥ ΜΕ ΠΡΟΕΠΙΛΕΓΜΕΝΕΣ ΣΥΝΔΕΤΙΚΕΣ- - ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ.....	79 -
3.2.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ.....	84 -
3.3 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	87 -

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....</b>	<b>- 89 -</b>
<b>4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>- 89 -</b>
<b>4.2 ΒΑΣΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ .....</b>	<b>- 91 -</b>
<b>4.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΚΟΠΤΙΚΩΝ .</b>	<b>-</b>
<b>93 -</b>	
<b>ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ .....</b>	<b>- 93 -</b>
<b>4.4 ΎΠΟΔΕΙΓΜΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ</b>	
<b>ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ .....</b>	<b>- 96 -</b>
<b>ΓΙΑ ΤΟΡΝΕΥΣΗ .....</b>	<b>- 96 -</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....</b>	<b>103</b>
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>103</b>
<b>5.1 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΟΥ ΔΙΑΜΕΛΙΣΜΟΥ (PARTITIONING)</b>	
<b>.....</b>	<b>103</b>
<b>5.2 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>104</b>
<b>5.3 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΥ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΟΣ .....</b>	<b>106</b>
<b>5.4 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ .....</b>	<b>107</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>110</b>



# ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 2-1</b>	<i>Μηχανικά μέρη τóρνου .....</i>	<b>11</b>
<b>Πίνακας 4-1</b>	<i>Χρόνος λειτουργίας [min] χωρίς βλάβες των κεραμικών κοπτικών εργαλείων.....</i>	<b>97</b>
<b>Πίνακας 4-2</b>	<i>Βασικοί δείκτες αξιοπιστίας κεραμικών κοπτικών εργαλείων .....</i>	<b>97</b>
<b>Πίνακας 4-3</b>	<i>Βασικές θεωρητικές συναρτήσεις αξιοπιστίας κεραμικών κοπτικών εργαλείων.....</i>	<b>98</b>
<b>Πίνακας 4-4</b>	<i>Στατιστικά χαρακτηριστικά των προτεινόμενων θεωρητικών κατανομών.....</i>	<b>100</b>
<b>Πίνακας 4-5</b>	<i>Βασικοί θεωρητικοί δείκτες αξιοπιστίας κεραμικών κοπτικών υλικών της κανονικής κατανομής.....</i>	<b>102</b>

# **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

<b>Σχήμα 2-1</b> Στάδια υπολογισμού αξιοπιστίας εργαλειομηχανής.....	8
<b>Σχήμα 2-2</b> Τυπική μορφή τórνου.....	11
<b>Σχήμα 2-3</b> Μεταβολή του μοναδιαίου κόστους σε συνάρτηση με την ταχύτητα κοπής για διαμήκη τórνευση.....	22
<b>Σχήμα 3-1</b> Ιεραρχικός διαμελισμός ενός συστήματος σε υποσυστήματα.....	29
<b>Σχήμα 3-2</b> Μήτρα συναρτήσεων και μεταβλητών που προκύπτει από τον ιεραρχικό διαμελισμό.....	29
<b>Σχήμα 3-3</b> Μήτρα μη-ιεραρχικού διαμελισμού.....	30
<b>Σχήμα 3-4</b> Ιεραρχική δομή μηχανουργικού συστήματος.....	31
<b>Σχήμα 3-5</b> Η διαδικασία συλλογής και ομαδοποίησης εξισώσεων και μεταβλητών.....	35
<b>Σχήμα 3-6</b> Η διαδικασία του διαμελισμού σε υποσυστήματα και η επιλογή των μεταβλητών και εξισώσεων για ανάλυση σε επίπεδο συστήματος.....	35
<b>Σχήμα 3-8</b> Διαχωρισμός συναρτήσεων.....	74
<b>Σχήμα 3-9</b> Διαχωρισμός συναρτήσεων στη δεύτερη εφαρμογή της μεθόδου.....	82
<b>Σχήμα 4-1</b> Σχηματική απεικόνιση αλγορίθμου για τον καθορισμό της αξιοπιστίας κοπτικών εργαλείων βάσει της συγκριτικής ανάλυσης.....	95
<b>Σχήμα 4-2</b> Γραφική απεικόνιση των κύριων δεικτών αξιοπιστίας των κεραμικών κοπτικών υλικών για το μοντέλο της κανονικής κατανομής.....	102

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Η βελτιστοποίηση είναι μία τόσο σύγχρονη όσο και διαχρονική έννοια που καθορίζει πλέον όλες τις τεχνολογικές δραστηριότητες της εποχής μας με απώτερο σκοπό στις περισσότερες των περιπτώσεων τον βέλτιστο συνδυασμό ευνοϊκών οικονομικών μεγεθών με την παραγωγή ποιοτικών προϊόντων. Οι μαθηματικές μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για να βελτιστοποιηθούν διάφορες συναρτήσεις είναι πολλές και συνήθως προσαρμόζονται στη φύση του προβλήματος που τίθεται προς βελτιστοποίηση. Το σύστημα κατεργασία – εργαλειομηχανή προσφέρει ένα πολυδιάστατο πρόβλημα προς μελέτη καθώς η ανάλυση του εμπλέκει διαφορετικά επιστημονικά πεδία. Η μέθοδος του διαμελισμού (partitioning) που χρησιμοποιείται εδώ μας προσφέρει τα εφόδια για να αντιμετωπίσουμε προβλήματα τέτοιου είδους. Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι να γίνει μια προσπάθεια βελτιστοποίησης του συστήματος κατεργασία - εργαλειομηχανή με τη μέθοδο του διαμελισμού, ώστε να τη γνωρίσουμε μέσα από την εφαρμογή της σε αυτό το σύστημα.

### 1.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Δεν υπάρχουν αρκετές μελέτες που να βασίζονται στη μέθοδο που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, πόσο μάλλον μελέτες που χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του διαμελισμού (partitioning) αναλύουν το σύστημα κατεργασίας-εργαλειομηχανής. Στη μελέτη των G. Subbarayan, R. Raj, με τίτλο “A methodology for integrating materials science with system engineering” χρησιμοποιείται το παράδειγμα της σχάρας βολφραμίου για λαμπτήρες πυρακτώσεως με σκοπό να επεξηγηθεί η συγκεκριμένη μέθοδος. Στην προαναφερθείσα μελέτη περιγράφεται πως το σύστημα μπορεί να διαχωριστεί σε δύο υποσυστήματα, όπου το πρώτο σχετίζεται κυρίως με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και το δεύτερο με τη μικροδομή του εξεταζόμενου αντικειμένου.

Στην εργασία των O. Sbaijero και R. Raj με τίτλο “System-level optimization and design of the high speed machining process using ceramic cutting tools” χρησιμοποιείται η μέθοδος του διαμελισμού ώστε να συνδεθούν τα επιστημονικά

πεδία της δυναμικής ανάλυσης και της μετάδοσης θερμότητας με το πεδίο της επιστήμης των υλικών και συγκεκριμένα με τη μελέτη των ιδιοτήτων της μικροδομής των υλικών, με βάση τη μελέτη των κεραμικών κοπτικών εργαλείων.

Η σημαντικότερη διαφορά ανάμεσα στις δύο δημοσιεύσεις, όσο αφορά τη μεθοδολογία που ακολουθείται, είναι ότι ενώ στην εργασία των G. Subbarayan και R. Raj οι συνδετικές μεταβλητές προκύπτουν από τα πρώτα στάδια της μεθόδου, στην εργασία των O. Sbaijero και R. Raj οι συνδετικές μεταβλητές καθορίζονται *πριν την* έναρξη της μεθόδου με κριτήρια φυσικά και εμπειρικά. Πάντως και στις δύο μελέτες υπογραμμίζεται ότι η επιλογή των συνδετικών μεταβλητών, καθώς και ο διαμελισμός σε υποσυστήματα είναι διαδικασίες που υποπίπτουν στην κρίση του μελετητή και δεν υπάρχει ένας και μοναδικός τρόπος για να αναπτυχθεί η μέθοδος του διαμελισμού. Επίσης στη δεύτερη μελέτη χρησιμοποιείται ο βαθμός συνδετικότητας για να αναπτυχθεί η μέθοδος και να διαμελιστεί το σύστημα σε μικρότερα υποσυστήματα.

Οι υπάρχουσες μελέτες που είναι σχετικές με τις κατεργασίες κοπής υψηλής ταχύτητας μπορούν να ταξινομηθούν σε τρία πεδία:

1. Στο πρώτο πεδίο περιλαμβάνονται εργασίες που στηρίζονται στις βασικές σχέσεις των ιδιοτήτων της μικροδομής των κεραμικών υλικών και σχετίζονται με την εφαρμογή των κεραμικών στις κατεργασίες υψηλής ταχύτητας. Τέτοιες μελέτες περιλαμβάνουν τον υπολογισμό της αντίστασης σε θερμική διαταραχή και της αντίστασης σε φθορά σε σχέση με τη σκληρότητα, τη θερμική αγωγιμότητα, το συντελεστή θερμοδιαχυτότητας και τη μικροδομή του υλικού. Άλλες μελέτες αναφέρονται στην εξάρτηση της σκληρότητας από τη θερμοκρασία και το μέγεθος κόκκου και εκτιμούν το συντελεστή θερμοδιαχυτότητας και τη θερμική αγωγιμότητα.
2. Στο δεύτερο πεδίο συναντάμε μελέτες που αναλύουν τις δυνάμεις και τις κινηματικές ιδιότητες της κοπής. Τέτοιες μελέτες περιλαμβάνουν τον υπολογισμό της δύναμης που ασκείται στο κοπτικό εργαλείο συναρτήσει της πρόωσης, της ταχύτητας κοπής και του βάθους κοπής. Επίσης γίνεται υπολογισμός της στιγμιαίας θερμοκρασίας που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της κοπής.

3. Στο τρίτο πεδίο συναντάμε μελέτες που σκοπεύουν στην ανάλυση της συνολικής απόδοσης της διαδικασίας και περιλαμβάνουν τις εξής κατηγορίες ανάλυσης: διάρκεια ζωής κοπτικού εργαλείου, ρυθμός φθοράς του κεραμικού εργαλείου, ποιότητα κατεργαζόμενης επιφάνειας και δείκτης παραγωγικότητας.

## 1.2 Οργάνωση διπλωματικής εργασίας

Το υπόλοιπο της διπλωματικής εργασίας χωρίζεται σε τέσσερις ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαια 2-5.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια πρώτη γνωριμία με το σύστημα κατεργασία-εργαλειομηχανή. Συγκεκριμένα βλέπουμε πως υπολογίζεται η αξιοπιστία και ο χρόνος ζωής της εργαλειομηχανής λαμβάνοντας υπόψη τη φθορά, αναφέρουμε ορισμένες βασικές έννοιες για την κατεργασία όπως οι παράγοντες και οι συνθήκες κοπής και μελετάμε τη διαδικασία βελτιστοποίησης της κατεργασίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο, που είναι και ο κορμός της διπλωματικής εργασίας, περιγράφεται η μέθοδος του διαμελισμού και τα στάδια που ακολουθούμε καθώς και πως εφαρμόζεται στο σύστημα κατεργασία-εργαλειομηχανή με δύο διαφορετικούς τρόπους. Όπως θα δούμε και στη συνέχεια, δεν υπάρχει ένα και μοναδικό μονοπάτι που πρέπει να ακολουθήσουμε για να αναλύσουμε το σύστημα.

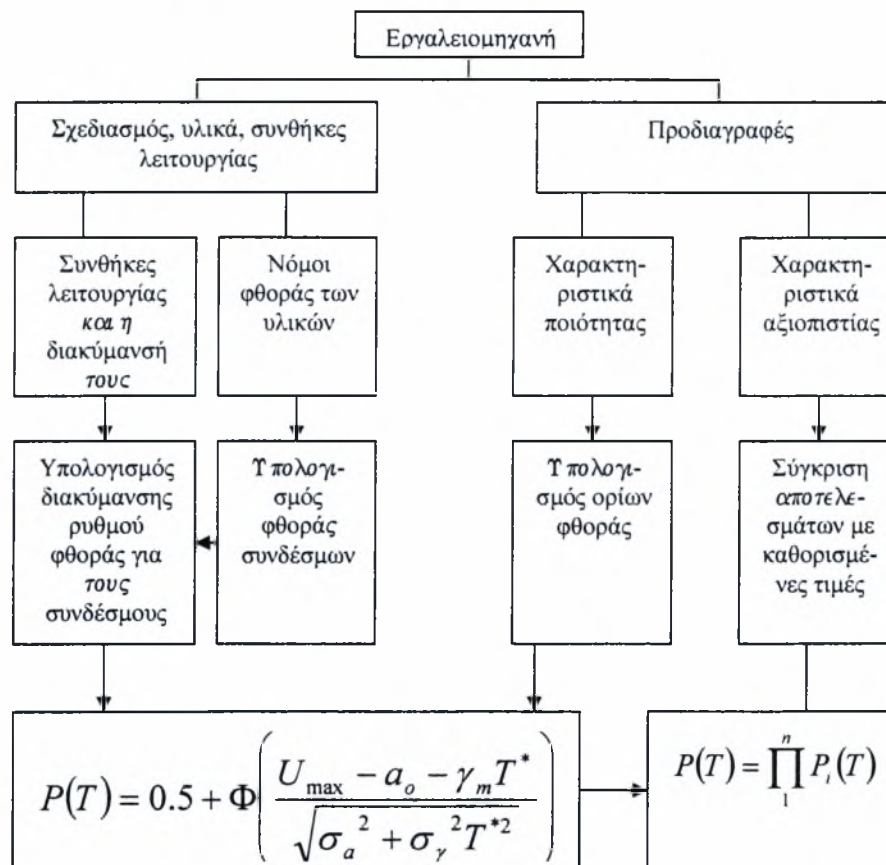
Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα στατιστικό παράδειγμα, που μπορεί να ακολουθηθεί για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σε μια ανάλυση που συμπεριλαμβάνει εργαστηριακά δεδομένα.

Τέλος στο Κεφάλαιο 5 δίνονται τα τελικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα.

## Κεφάλαιο 2

### 2.1 Αξιοπιστία εργαλειομηχανής

Ο υπολογισμός για την αξιοπιστία και χρόνο ζωής της εργαλειομηχανής λαμβάνοντας υπόψη τη φθορά των κοπτικών εργαλείων και των στοιχείων μηχανών που την απαρτίζουν περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (σχήμα 1).



Σχήμα 2-2 Στάδια υπολογισμού αξιοπιστίας εργαλειομηχανής

1. Καθορίζονται οι προδιαγραφές για τις παραμέτρους της μηχανής που περιλαμβάνουν:
  - Τα χαρακτηριστικά αξιοπιστίας και αντοχής, που είναι ο χρόνος λειτουργίας και οι επιτρεπτές τιμές για την πιθανότητα λειτουργίας χωρίς σφάλματα, ο συνολικός χρόνος διακοπής λειτουργίας για το χρόνο λειτουργίας ή ο συντελεστής αντοχής και επίσης τα



επιτρεπόμενα κόστη για την επιδιόρθωση και συντήρηση της εργαλειομηχανής

- Τα χαρακτηριστικά ποιότητας της μηχανής που είναι η ακρίβεια της λειτουργίας, η αποτελεσματικότητα, ο ρυθμός παραγωγής, η ποιότητα της κατασκευής της μηχανής και τα υπόλοιπα σχετικά μεγέθη
2. Καθορίζονται οι βασικοί φυσικοί νόμοι φθοράς που χαρακτηρίζουν τις συνθήκες λειτουργίας της μηχανής και που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της φθοράς.
  3. Ο υπολογισμός της φθοράς γίνεται με βάση τους φυσικούς νόμους φθοράς και το σχεδιασμό των συνδέσμων. Οι κρίσιμες παράμετροι των συνδέσμων καθορίζονται με βάση τον τύπο του συνδέσμου.
  4. Καθορίζονται τα όρια φθοράς για τα επιμέρους μέρη. Ο καθορισμός γίνεται σε σχέση με τις προδιαγραφές της μηχανής, πρωτίστως σε σχέση με την επιθυμητή ακρίβεια της λειτουργίας της μηχανής.
  5. Εκτιμούνται τα εφικτά όρια λειτουργίας της μηχανής και των επιμέρους στοιχείων της. Εκτιμούνται οι μέσες τιμές των φορτίων, των ταχυτήτων και των άλλων μεγεθών, αλλά συνεκτιμούνται και οι διακυμάνσεις τους.
  6. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και τις σχέσεις φθοράς καθορίζονται οι μέσοι ρυθμοί και η διακύμανση της φθοράς για κάθε σύνδεσμο.
  7. Υπολογίζεται η πιθανότητα λειτουργίας χωρίς σφάλματα για τιμές παραμέτρων που έχουμε εξάγει. Γίνεται χρήση της σχέσης 45(Πιν. Συνοφτ.).
  8. Στον υπολογισμό της πιθανότητας λειτουργίας χωρίς σφάλματα της μηχανής, για διάφορες τελικές παραμέτρους, π.χ. για διαφορετικά χαρακτηριστικά ακρίβειας, η συνολική πιθανότητα (με τις παραμέτρους να είναι ανεξάρτητες) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P(T) = \prod_{i=1}^n P_i(T) \quad (2.1)$$

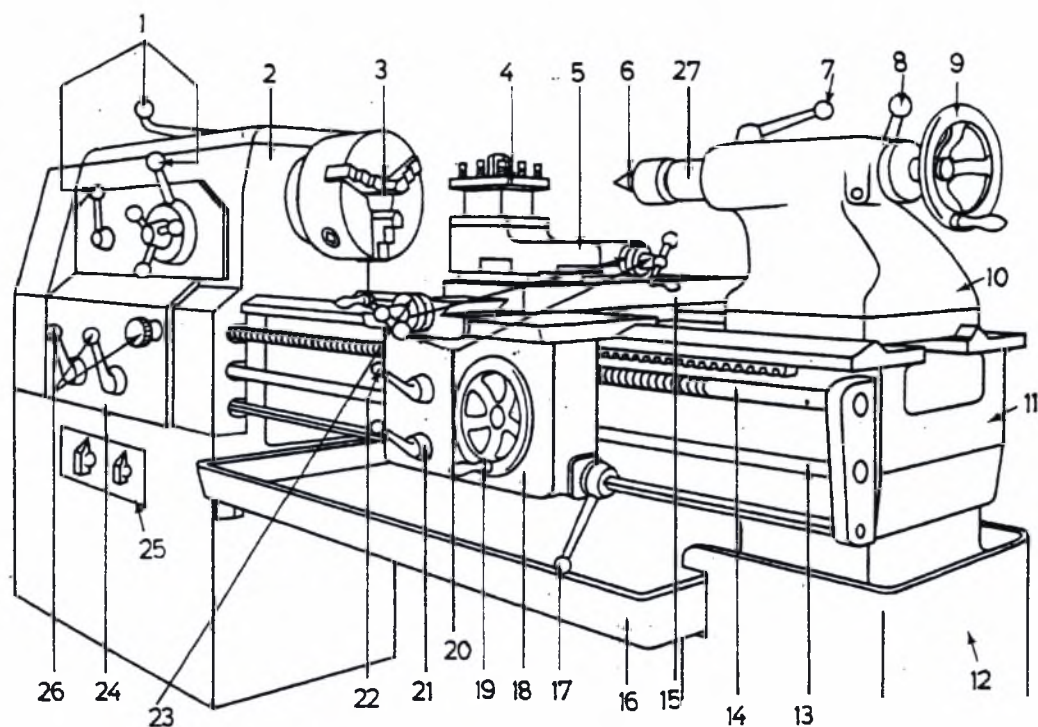
Εφόσον έχουν υπολογιστεί, τα χαρακτηριστικά της αξιοπιστίας συγκρίνονται με τις επιτρεπτές τιμές που καθορίζονται από τις προδιαγραφές της μηχανής.

Αν τα χαρακτηριστικά αξιοπιστίας –χρόνος ζωής και  $P(t)$ - δεν συναντούν τις προδιαγραφές, τότε αποφασίζεται σε ποια σημεία και σε ποιο βαθμό χρειάζεται να αυξηθεί η πιθανότητα λειτουργίας χωρίς σφάλματα, κατά τη διάρκεια του απαιτούμενου χρόνου λειτουργίας, ώστε να συναντηθούν οι κατάλληλες τιμές.

Οι σχεδιαστές είναι οικείοι με μεθόδους που αποσκοπούν στην αύξηση του χρόνου ζωής της μηχανής, όπως η χρήση υλικών αντίστασης στη φθορά, παροχή επαρκών συστημάτων λίπανσης, προστασία των τριβόμενων μερών ενάντια στη διάβρωση, αντιστάθμιση της φθοράς και εφαρμογή στοιχείων και μονάδων που αντικαθίστανται γρήγορα. Πρόσφατα γίνονται δημοφιλείς κάποιες άλλες κατευθύνσεις της ανάπτυξης σύγχρονου εξοπλισμού. Μπορούμε να υποδείξουμε τις ακόλουθες:

1. Τα σχέδια εκπονούνται στα επίπεδα φθοράς που επηρεάζουν τη λειτουργία της μηχανής ή του μηχανισμού στον ελάχιστο βαθμό.
2. Η αρχή της ομοιόμορφης φθοράς των επιφανειών, που είναι μία από τις μεθόδους για εφαρμογή της προηγούμενης, πιο γενικής αρχής, συνεισφέρει σε πολλές περιπτώσεις σε παρατεταμένο χρόνο λειτουργίας.
3. Σταθερές συνθήκες στα τριβόμενα μέρη, όπως θερμοκρασία και φορτίο, έχουν σαν αποτέλεσμα σωστή λειτουργία, μικρή φθορά και την απουσία μη επιτρεπτών τύπων φθοράς σε κρίσιμους συνδέσμους. Για αυτό το λόγο διαδίδονται συσκευές που παρέχουν τέτοιες σταθερές συνθήκες.
4. Η δράση εξωτερικών αιτίων, κυρίως δυνάμεων, μεταφέρεται από τους κρίσιμους συνδέσμους σε συνδέσμους που είναι λιγότερο κρίσιμοι. Έτσι αυξάνεται ο χρόνος λειτουργίας και η ακρίβεια της λειτουργίας.
5. Αυτοματοποίηση της αντιστάθμισης της φθοράς.

Ο υπολογισμός της φθοράς στους συνδέσμους της μηχανής και στους μηχανισμούς είναι απαραίτητο προαπαιτούμενο στη λήψη βέλτιστων αποφάσεων στο στάδιο του σχεδιασμού, εφόσον τα τριβολογικά συστατικά εγγυώνται την απαιτούμενη αξιοπιστία των χαρακτηριστικών της μηχανής εντός των καθορισμένων συνθηκών λειτουργίας.



Σχήμα 2-2 Τυπική μορφή τόρνου

A/A	Στοιχείο	A/A	Στοιχείο
1	Μοχλοί ταχυτήτων	15	Εγκάρσιο φορτίο
2	Κιβώτιο ταχυτήτων	16	Λεκάνη αποβλήτων
3	Αυτόματο τσοκ	17	Μοχλός εκκινήσεως
4	Πολλαπλός εργαλειοδέτης	18	Κύριο εργαλειοφορείο
5	Φορείο εργαλειοδέτη	19	Χειροτροχός κύριου εργαλειοφορείου
6	Έμβολο	20	Χειροστροφάλοι προώσεων
7	Μοχλός συσφίξεως εμβόλου	21	Μοχλός αυτόματης προώσεως
8	Μοχλός συσφίξεως κεντροφορέα	22	Μοχλός κοπής σπειρωμάτων
9	Χειροτροχός μετακινήσεως εμβόλου	23	Βαθμονομημένοι δακτύλιοι
10	Κεντροφορέας (κουκουβάγια)	24	Κιβώτια προώσεως και σπειρωμάτων
11	Τραπέζι	25	Ηλεκτρικοί διακόπτες
12	Βάση	26	Μοχλοί επιλογής προώσεων
13	Βέργα (άξονας) προώσεως	27	Έμβολο κεντροφορέα
14	Κοχλίας κοπής σπειρωμάτων		

Πίνακας 2- 1 Μηχανικά μέρη τόρνου

## 2.2.1 Κατεργασία

Η κατεργασία των μετάλλων είναι μια διαδικασία που μπορεί να διαφοροποιείται σε μεγάλο βαθμό για κάθε συγκεκριμένη περίπτωση. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με την κατεργασία κοπής των μετάλλων με χρήση κεραμικών εργαλείων κοπής και θα περιοριστούμε σε βασικές και γενικές αρχές που θα μας χρησιμεύσουν για την εκπόνηση της μελέτης, χωρίς να επεκταθούμε σε θέματα αμιγώς μηχανολογικά. Η μελέτη θα επικεντρωθεί στους τομείς που μας αρκούν ώστε να έχουμε ικανοποιητική αντίληψη των φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την κοπή των μετάλλων, ώστε μέσα από τη διαδικασία βελτιστοποίησης που θα ακολουθήσουμε να είμαστε σε θέση να διακρίνουμε εκείνες τις παραμέτρους του φαινομένου που αποτελούν τη βάση για να υποστηρίξουμε το μαθηματικό μοντέλο που θα προκύψει. Επομένως η αντιμετώπιση της κατεργασίας, αλλά και της εργαλειομηχανής που θα ακολουθήσει, θα είναι εντελώς στοιχειώδης.

## 2.2.2 Παράγοντες κοπής

Με τον όρο παράγοντες κοπής ή φυσικές μεταβλητές κοπής εννοούμε περιεκτικά τα ακόλουθα:

- Συνθήκες κατεργασίας (ταχύτητα κοπής, πρόωση ανά δόντι ή ανά περιστροφή, βάθος κοπής)
- Γεωμετρική μορφή εργαλείου (γωνία αποβλήτου, γωνία λοξότητας, γωνία θέσεως κ.α.)
- Κατεργαζόμενο υλικό
- Υλικό κοπτικού εργαλείου
- Υγρό κοπής
- Δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος εργαλειομηχανή- εργαλείο-τεμάχιο

Ορισμένοι κατά περίπτωση κατεργασίας παράγοντες κοπής, ιδιαίτερα οι ποσοτικά εκφραζόμενοι, είναι δυνατό να αποτελέσουν ανεξάρτητες μεταβλητές ή παραμέτρους σε θεωρητικές ή εμπειρικές σχέσεις προσδιορισμού εξαρτημένων μεταβλητών της κοπής, όπως είναι η ζωή του εργαλείου, οι δυνάμεις κοπής, το μέσο ύψος τραχύτητας κ.λ.π.. Επίσης μπορούν να αποτελέσουν ανεξάρτητες μεταβλητές σε εκφράσεις

παράγωγων μεγεθών της κοπής, όπως είναι η γωνία διατμήσεως, η διατμητική παραμόρφωση, ο δείκτης συμπίεσης αποβλήτου και η μέση θερμοκρασία κοπής. Με τον όρο ποσοτικά εκφραζόμενοι παράγοντες κοπής εννοούμε, αναφερόμενοι για παράδειγμα στο κατεργαζόμενο μέταλλο, το όριο διαρροής, τη μέγιστη αντοχή ή τη σκληρότητά του.

Εδώ μπορούμε να προσθέσουμε, ότι πέραν των φυσικών μεταβλητών της κοπής των μετάλλων, οι οποίες εισάγονται ως ανεξάρτητες μεταβλητές στους υπολογισμούς μας, οφείλουμε να θεωρήσουμε και ως εξαρτημένες μεταβλητές κάποια μεγέθη όπως είναι οι δυνάμεις κοπής, η φθορά και η ζωή του κοπτικού εργαλείου, η μέση ταχύτητα κατεργασμένων επιφανειών κ.α..

### 2.2.3 Συνθήκες κατεργασίας

Από τους παράγοντες κοπής που αναφέρθηκαν παραπάνω αξίζει να αναφερθούμε εκτεταμένα στις συνθήκες κοπής. Πρέπει να τονίσουμε ότι η κατάλληλη εκλογή των τιμών για τις συνθήκες κατεργασίας ενέχει εξαιρετική σημασία στην όλη επιτυχία και αποδοτικότητα (ποιοτική και ποσοτική) της κατεργασίας και στην εκμετάλλευση της εργαλειομηχανής που χρησιμοποιούμε.

Η ταχύτητα κοπής και η πρόωση μαζί με το βάθος κοπής αποτελούν ό,τι ονομάζουμε συνθήκες κατεργασίας ή συνθήκες κοπής. *Ταχύτητα κοπής ονομάζουμε τη στιγμιαία ταχύτητα της πρωτεύουσας κινήσεως κάποιου σημείου  $P$  της κόψης του εργαλείου, που επιλέγουμε, ως προς το κατεργαζόμενο κομμάτι.* Τη μετρούμε συνήθως σε μέτρα ανά λεπτό (m/min). Στην πράξη η ταχύτητα κοπής είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από την ταχύτητα προώσεως, γεγονός που μας επιτρέπει να θεωρήσουμε τη δεύτερη αμελητέα και να δεχθούμε ότι η ταχύτητα κοπής  $v$  είναι κατά προσέγγιση ίση με τη συνισταμένη ταχύτητα κοπής  $v_e$ . Βέβαια, για να γίνει αυτό πλήρως κατανοητό θα έπρεπε να επεκταθούμε σε θέματα κινηματικής της κοπής, αλλά δεν θα το κάνουμε για λόγους οικονομίας.

*Ταχύτητα προώσεως είναι η στιγμιαία ταχύτητα της συνεχούς κινήσεως προώσεως ενός σημείου  $P$  της κόψης του εργαλείου ως προς το κομμάτι.* Την εκφράζουμε σε χιλιοστά ανά λεπτό (mm/min). Η πρόωση  $s$  ορίζεται ως η μετατόπιση του εργαλείου (ή του κομματιού) σχετικά προς το κομμάτι (ή το εργαλείο) στην κατεύθυνση της κίνησης προώσεως σε μία περιστροφή ή μια ενεργό διαδρομή του κομματιού ή του



εργαλείου. Στη διαμήκη τórνευση π.χ. η πρόωση εκφράζεται ως η μετατόπιση του εργαλείου σε χιλιοστά κατά μήκος του άξονα του κομματιού (κατεύθυνση προώσεως) σε μια περιστροφή του κομματιού, δηλαδή σε mm/στρ.

*Τέλος λέγοντας βάθος κοπής εννοούμε την απόσταση ανάμεσα στην ακατέργαστη και στην κατεργασμένη επιφάνεια του τεμαχίου ή το βάθος στο οποίο θέλουμε να εισχωρήσει το εργαλείο μέσα στο υλικό του τεμαχίου. Σύμφωνα πάλι με άλλο ορισμό, βάθος κοπής είναι το βάθος της επιφανειακής στρώσεως μετάλλου που αφαιρείται σε ένα πέρασμα του εργαλείου (ως προς το κομμάτι) ή του κομματιού (ως προς το εργαλείο), μετρούμενο κάθετα προς την κατεργασμένη επιφάνεια, όπως π.χ. ακτινικά στη διαμήκη τórνευση.*

Πέρα από τις συνθήκες κατεργασίας, που ορίσαμε, κρίνεται σκόπιμο να δώσουμε τον ορισμό και δύο ακόμη κύριων μεγεθών, που ενδιαφέρουν τις κατεργασίες κοπής: το ρυθμού αφαιρέσεως υλικού και το χρόνο κοπής.

Ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού αποτελεί το δείκτη ποσοτικής δυναμικότητας (παραγωγικότητας) της κάθε κατεργασίας και δίνεται γενικευμένα από τον ακόλουθο τύπο:

$$\Theta = Av \quad [\text{cm}^3/\text{min}] \quad (2.2)$$

όπου  $A$  σε  $\text{mm}^2$  είναι η θεωρητική διατομή του αποβλήτου και  $v$  σε  $\text{m/min}$  η ταχύτητα κοπής. Στην παρούσα εργασία δεν χρησιμοποιείται ο παραπάνω τύπος ως δείκτης παραγωγικότητας. Προτιμήσαμε μια σχέση που περιέχει το χρόνο ζωής του εργαλείου και το χρόνο αντικατάστασής του ώστε να γενικεύεται η έννοια της παραγωγικότητας. Η εξίσωση που χρησιμοποιήσαμε είναι η σχέση 18 στον πίνακα των συναρτήσεων, δηλαδή η ακόλουθη:

$$P = \frac{hV\Omega}{\Omega - t^*} \quad (2.3)$$

Όπου: $P$	Παραγωγικότητα
$h_e$	Ισοδύναμο πάχος αποβλήτου
$\Omega$	Ζωή κοπτικού εργαλείου
$t^*$	Χρόνος αντικατάστασης εργαλείου
$V$	Ταχύτητα κοπής



Επίσης ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$M_R = 12FDOCV \quad (2.4)$$

Όπου: $M_R$	Ρυθμός αφαίρεσης υλικού
$F$	Ρυθμός τροφοδοσίας
$DOC$	Βάθος κοπής
$V$	Ταχύτητα κοπής

Ο χρόνος κοπής περιλαμβάνει τον καθαρό χρόνο κοπής κατά τον οποίο το κοπτικό εργαλείο αποκόπτει μαζί με το χρόνο που απαιτείται για την προσέγγιση του εργαλείου στο κομμάτι και το χρόνο για την απομάκρυνση του εργαλείου από το τεμάχιο. Ο χρόνος κοπής σε *min* εκφράζεται στη γενική περίπτωση ως εξής:

$$t_c = \frac{L}{S} i \quad [\text{min}] \quad (2.5)$$

Όπου: $t_c$	Χρόνος κοπής
$L$	Μήκος κατά το οποίο μετατοπίζεται συνολικά το εργαλείο
$S$	Πρόωση
$i$	Αριθμός των περασμάτων που είναι απαραίτητα για την εκτέλεση της συγκεκριμένης κατεργασίας

Η έκφραση του χρόνου κοπής μας ενδιαφέρει, γιατί υπεισέρχεται στο μαθηματικό μοντέλο του κόστους της μονάδας παραγωγής ή του ρυθμού παραγωγής εισάγοντας τις ανεξάρτητες μεταβλητές  $V$  και  $S$ . Επίσης όπως θα δούμε και στη συνέχεια ο χρόνος κοπής θα αποτελέσει βασικό εργαλείο για τη μέθοδο του διαμελισμού μέσω της **παραδοχής** που θα κάνουμε όσο αφορά το χρόνο φθοράς των μηχανικών μερών της εργαλειομηχανής.

Ο συνολικός χρόνος κατεργασίας πέρα από το χρόνο κοπής περιλαμβάνει και χρόνους που απαιτούνται για την εκτέλεση διάφορων βοηθητικών κινήσεων και εργασιών.

## **2.2.4 Βελτιστοποίηση συστημάτων κατεργασιών κοπής**

### **2.2.4.1 Εισαγωγή**

Σήμερα οι μεθοδολογίες βελτιστοποίησης συστημάτων κατεργασιών κοπής περιλαμβάνουν ένα μεγάλο αριθμό αναλυτικών και αριθμητικών τεχνικών. Τα κριτήρια που αποτελούν τη βάση κάθε οικονομικής μελέτης είναι το κριτήριο του ελάχιστου χρόνου παραγωγής, το κριτήριο του ελάχιστου κόστους παραγωγής και το κριτήριο της μέγιστης απόδοσης κεφαλαίου.

### **2.2.4.2 Βασικές έννοιες και ορισμοί**

1. Η βελτιστοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί σε πλήρες σύστημα κατεργασιών διαμόρφωσης (π.χ. σφυρηλάτηση) ή πρωτογενούς μορφοποίησης (π.χ. χύτευση) ή σε κατεργασίες με αποβολή υλικού (κοπή, λείανση κλπ) ή σε συναρμολόγηση αντικειμένων. Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει θα περιοριστούμε στη βελτιστοποίηση της κατεργασίας κοπής.
2. Γίνεται διάκριση σε συστήματα μιας βαθμίδας (single-stage manufacturing) όπου η κατεργασία ολοκληρώνεται σε ένα βήμα (π.χ. μια εργαλειομηχανή με συγκεκριμένο κοπτικό εργαλείο και κοπή σε ένα πάσο) και συστήματα πολλών βαθμίδων (multi-stage manufacturing) όπου για την ολοκλήρωση του κύκλου παραγωγής απαιτείται η διέλευση του τεμαχίου διαδοχικά από πολλές εργαλειομηχανές ή σταθμούς κατεργασιών. Τέτοια περίπτωση θα μπορούσε να είναι η εκχόνδριση σε τόρνο, τρία στάδια τórνευσης σε αυτόματο τόρνο ή CNC και αποπεράτωση σε λειαντικό μηχάνημα.
3. Για τη βελτιστοποίηση των συστημάτων κατεργασιών χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα οικονομικά κριτήρια:
  - i. **Το κριτήριο της μέγιστης παραγωγικότητας ή ελάχιστου χρόνου.**  
Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο μεγιστοποιείται ο αριθμός των παραγόμενων τεμαχίων στη μονάδα του χρόνου ή ισοδύναμα ελαχιστοποιείται ο χρόνος παραγωγής ανά τεμάχιο.

- ii. **Το κριτήριο ελάχιστου κόστους.** Το κριτήριο αυτό αναφέρεται στην παραγωγή ενός τεμαχίου με το ελάχιστο κόστος. Συμπίπτει με το κριτήριο μέγιστης απόδοσης για σταθερή τιμή πώλησης.
  - iii. **Το κριτήριο της μέγιστης απόδοσης κεφαλαίου.** Το κριτήριο αυτό μεγιστοποιεί το κέρδος που επιτυγχάνεται σε δεδομένο χρονικό διάστημα.
4. Σε κάθε σύστημα κατεργασιών επιδεχόμενο βελτιστοποίησης υπάρχουν ελεγχόμενες και μη ελεγχόμενες παράμετροι. Για παράδειγμα σε μια κατεργασία κοπής το κοπτικό εργαλείο και ο χειριστής της εργαλειομηχανής θεωρούνται μη ελεγχόμενες παράμετροι, ενώ τυπικές ελεγχόμενες μεταβλητές είναι οι συνθήκες κοπής (βάθος κοπής, πρόωση και ταχύτητα κοπής). Το βάθος κοπής εξαρτάται από το μέγεθος του τεμαχίου και τις τελικές διαστάσεις του προϊόντος και θα θεωρείται σταθερό. Οι άλλες δύο συνθήκες κοπής μπορούν να ορισθούν αυθαίρετα μέσα στα όρια που επιτρέπουν τα χρησιμοποιούμενα κοπτικά εργαλεία.
5. Ως μοναδιαίος χρόνος παραγωγής ορίζεται ο μέσος χρόνος που απαιτείται για να παραχθεί ένα εξάρτημα και ως μοναδιαίο κόστος παραγωγής ορίζεται το μέσο συνολικό κόστος της παραγωγής ενός εξαρτήματος χρησιμοποιώντας μια εργαλειομηχανή.

#### **2.2.4.3 Βελτιστοποίηση συστήματος κοπής μιας βαθμίδας**

Θεωρούμε την κατεργασία μιας παρτίδας  $N_b$  τεμαχίων σε εργαλειομηχανή κοπής, σε ένα στάδιο, δηλαδή σε ένα πάσο, και αναζητούμε τις συνθήκες κοπής που είναι οι βέλτιστες σύμφωνα με ένα από τα τρία κριτήρια βελτιστοποίησης που έχουν ήδη αναφερθεί.

Η βελτιστοποίηση αφορά τις ελεγχόμενες παραμέτρους κοπής, που είναι η ταχύτητα κοπής και η πρόωση, με την παραδοχή ότι έχουμε σταθερό βάθος κοπής. Χωρίς βλάβη της γενικότητας το αναλυτικό μοντέλο θα καταστρωθεί για την περίπτωση της διαμήκους τόννευσης. Το μοντέλο αυτό με ορισμένες τροποποιήσεις που θα παρουσιαστούν στο τέλος της ενότητας ισχύει και για τις υπόλοιπες κατεργασίες κοπής. Η μαθηματική βελτιστοποίηση γίνεται ως προς την ταχύτητα κοπής ενώ η πρόωση επιλέγεται σε μια προκαθορισμένη κατάλληλη τιμή. Για την επιλογή της πρόωσης εξετάζεται η εκχόνδριση σε κατεργασία κοπής (τόρνευση).

#### 2.2.4.3.1 Επιλογή πρόωσης

Για να εξηγηθεί πως επιλέγεται η κατάλληλη πρόωση σε μια κατεργασία εκχόνδρισης, πρέπει να εξετασθεί η επίδραση της ταχύτητας κοπής και της πρόωσης στη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου. Από τη μελέτη της θερμικής φόρτισης κατά την τόννευση έχει διαπιστωθεί ότι ίσες αλλαγές στην ταχύτητα ή την πρόωση ασκούν ίση επίδραση στη θερμοκρασία του κοπτικού. Εντούτοις, η αύξηση στην πρόωση δεν επηρεάζει τη σχετική ταχύτητα ολίσθησης στην επιφάνεια φθοράς του εργαλείου ενώ η ταχύτητα ολίσθησης αλλάζει αναλογικά με την ταχύτητα κοπής. Δεδομένου ότι η φθορά των εργαλείων είναι συνάρτηση και της θερμοκρασίας και της σχετικής ταχύτητας ολίσθησης, συνάγεται ότι η αύξηση στην ταχύτητα κοπής οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση της διάρκειας ζωής του κοπτικού εργαλείου απ' ό,τι ίση αύξηση στην πρόωση.

Εξάλλου η πρακτική εμπειρία υποδεικνύει ότι όταν απαιτείται ένας υψηλός ρυθμός παραγωγής σε κατεργασία εκχόνδρισης, είναι πάντα προτιμότερο να αυξηθεί η πρόωση παρά η ταχύτητα. Αυτό δεν είναι πάντα εφικτό δεδομένου ότι γενικά, η αύξηση στην πρόωση αυξάνει τις δυνάμεις που καταπονούν το κοπτικό, ενώ η αύξηση στην ταχύτητα κοπής δεν έχει την ίδια επίδραση. Υπάρχει λοιπόν, ένα όριο στην αύξηση της πρόωσης το οποίο εξαρτάται από τη μέγιστη δύναμη κοπής που μπορεί να αντέξει η εργαλειομηχανή. *Σε κάθε περίπτωση η κατευθυντήρια αρχή στην επιλογή των βέλτιστων συνθηκών κοπής σε κατεργασία εκχόνδρισης είναι ότι η πρόωση πρέπει πάντα να τίθεται στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή.*

#### 2.2.4.3.2 Επιλογή ταχύτητας κοπής

Θα χρησιμοποιήσουμε δύο διακριτά κριτήρια για την επιλογή της ταχύτητας κοπής. Αυτά είναι το ελάχιστο κόστος παραγωγής και ο ελάχιστος χρόνος παραγωγής. Θα εξεταστεί πρώτα η βέλτιστη ταχύτητα κοπής που δίνει το ελάχιστο κόστος παραγωγής σε μια κατεργασία σταθερής ταχύτητας κοπής όπως είναι η κυλινδρική τόννευση. Σε αυτή την περίπτωση ο χρόνος που απαιτείται για την παραγωγή μιας παρτίδας εξαρτημάτων  $N_b$  (απασχόληση χειριστή και εργαλειομηχανής), μπορεί να χωριστεί σε τρία διακριτά τμήματα:

1. Τον μη παραγωγικό χρόνο, που δίνεται από το γινόμενο  $N_b t_i$  όπου  $t_i$  είναι ο χρόνος που απαιτείται για να φορτωθεί και να ξεφορτωθεί κάθε τεμάχιο και για να επιστρέψει το εργαλείο στην αρχή της κοπής.
2. Τον συνολικό χρόνο κατεργασίας στην εργαλειομηχανή, που δίνεται από το γινόμενο  $N_b t_m$ , όπου  $t_m$  είναι ο χρόνος κατεργασίας για κάθε τεμάχιο (καθαρός χρόνος κοπής).
3. Τον συνολικό χρόνο που αφορά την αλλαγή των φθαρμένων εργαλείων, και δίνεται από το γινόμενο  $N_t t_c$ , όπου  $t_c$  ο χρόνος αλλαγής του εργαλείου και  $N_t$  ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων εργαλείων.

Κατά συνέπεια, αν  $M$  είναι το ολικό ανά μονάδα χρόνου κόστος εξοπλισμού και χειριστή συμπεριλαμβανομένων των γενικών εξόδων, το συνολικό κόστος εργαλειομηχανής και χειριστή θα είναι:

$$M(N_b t_i + N_b t_m + N_t t_c)$$

Σε αυτό το κόστος πρέπει να συμπεριληφθεί το κόστος των χρησιμοποιούμενων εργαλείων, που δίνεται από το γινόμενο  $N_t C_t$ , όπου το  $C_t$  είναι το κόστος κάθε εργαλείου. Το μέσο κόστος παραγωγής  $C_{pr}$  ανά τεμάχιο κατά συνέπεια προκύπτει ως:

$$C_{pr} = M t_i + M t_m + M \frac{N_t}{N_b} t_{ci} + \frac{N_t}{N_b} C_t \quad (2.6)$$

Το πρώτο στοιχείο στο δεξιό μέρος της εξίσωσης είναι το μη παραγωγικό κόστος, το οποίο είναι σταθερό για συγκεκριμένη κατεργασία. Το δεύτερο στοιχείο είναι το κόστος κατεργασίας, το οποίο μειώνεται όσο η ταχύτητα κοπής αυξάνεται, με σταθερή πρόωση πάντα. Τα δύο επόμενα στοιχεία αποτελούν το κόστος εργαλείων, το οποίο αυξάνεται καθώς η ταχύτητα κοπής αυξάνεται.

Για να υπολογιστεί ο αριθμός των κοπτικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή μιας παρτίδας εξαρτημάτων είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η σχέση μεταξύ της ταχύτητας κοπής και της αντίστοιχης διάρκειας ζωής του κοπτικού. Σύμφωνα με τη σχέση του Taylor ισχύει:

$$\frac{V}{V_r} = \left( \frac{\Omega}{\Omega_r} \right)^n \quad (2.7)$$

Όπου: V	Ταχύτητα κοπής
$\Omega$	Διάρκεια ζωής κοπτικού
$\eta$	Σταθερά
$\Omega_r$	Διάρκεια ζωής κοπτικού για δεδομένη $V_r$

Η τιμή της  $\Omega_r$  μπορεί να βρεθεί για ένα κατεργάσιμο υλικό είτε πειραματικά είτε από τα δημοσιευμένα στοιχεία. Ο δείκτης  $\eta$  εξαρτάται κυρίως από το υλικό των εργαλείων.

Ο αριθμός των εργαλείων που χρησιμοποιούνται στην κατεργασία της παρτίδας των εξαρτημάτων δίνεται από τη σχέση  $N_{btm}/\Omega$  υποθέτοντας ότι το εργαλείο είναι σε επαφή με το κατεργαζόμενο τεμάχιο καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου κατεργασίας. Κατά συνέπεια:

$$\frac{N_i}{N_b} = \frac{t_m}{\Omega} = \frac{t_m}{t_r} \left( \frac{V}{V_r} \right)^{1/n} \quad (2.8)$$

Τέλος ο χρόνος κατεργασίας για ένα τεμάχιο δίνεται από τη σχέση:

$$t_m = \frac{K}{V} \quad (2.9)$$

όπου το V είναι η ταχύτητα κοπής και το K είναι μια σταθερά χαρακτηριστική της συγκεκριμένης κατεργασίας κοπής. Στην κυλινδρική τórνευση, παραδείγματος χάριν, η τιμή του K δίνεται ως

$$K = \pi d_w l_w / S \quad (2.10)$$

Όπου: $l_w$	Μήκος τórνευσης
$d_w$	Διάμετρος κατεργαζόμενου τεμαχίου
S	Πρόωση

Γενικά το K μπορεί να θεωρηθεί ως το μήκος κίνησης της αιχμής του εργαλείου σχετικά με το κατεργαζόμενο τεμάχιο κατά τη διάρκεια της κοπής.

Τελικά η σχέση μεταξύ του κόστους παραγωγής και της ταχύτητας κοπής λαμβάνεται από τη σχέση:



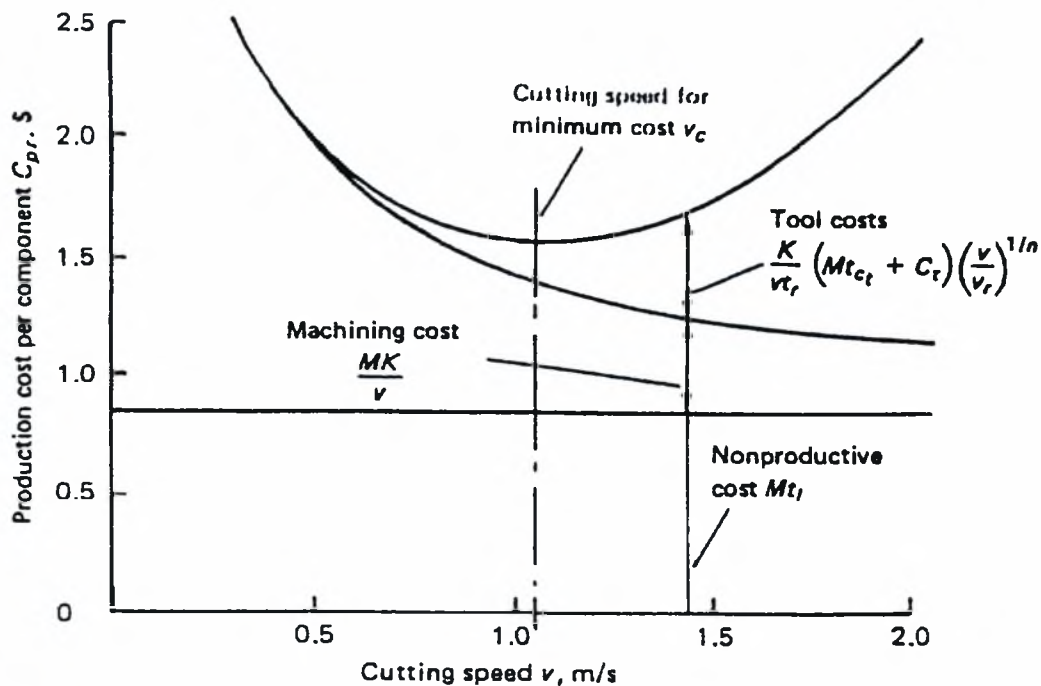
$$CP_r = Mt_l + Mk^*V^{-1} + \frac{k^*}{V_r^{1/\eta}\Omega_r}(Mt_{ct} + C_t)V^{(1-\eta)/\eta} \quad (2.11)$$

Όπου: CPr	Μέσο κόστος παραγωγής ανά τεμάχιο
M	Ολικό ανά μονάδα χρόνου κόστος εξοπλισμού και χειριστή
t <sub>l</sub> <sup>*</sup>	Χρόνος που απαιτείται για να φορτωθεί και να ξεφορτωθεί κάθε τεμάχιο και να επιστρέψει το εργαλείο στην αρχή της κοπής
k <sup>*</sup>	Σταθερά
C <sub>t</sub>	Κόστος κάθε εργαλείου
t <sub>ct</sub>	Χρόνος αλλαγής κάθε εργαλείου
η	Σταθερά
V	Ταχύτητα κοπής
Ω <sub>r</sub>	Διάρκεια ζωής κοπτικού εργαλείου για δεδομένη ταχύτητα κοπής V <sub>r</sub>

Για να βρεθεί η ταχύτητα κοπής για το ελάχιστο κόστος, παραγωγίζουμε την εξίσωση (2.11) και εξισώνουμε την παράγωγο με μηδέν. Οπότε προκύπτει:

$$V_c = V_r \left( \frac{n}{1-n} \frac{Mt_r}{Mt_{ct} + C_t} \right)^n \quad (2.12)$$

Η επίδραση της ταχύτητας κοπής στο κόστος παραγωγής μπορεί να παρουσιαστεί σαφέστερα υπό μορφή γραφήματος, βλέπε σχήμα 2.2. Στο σχήμα αυτό τα τρία διακριτά στοιχεία κόστους που υπεισέρχονται στην εξίσωση 2.11, δηλαδή το μη παραγωγικό κόστος, το κόστος κατεργασίας και το κόστος των εργαλείων, σχεδιάζονται χωριστά και υποδεικνύουν πώς μια βέλτιστη ταχύτητα κοπής προκύπτει για ένα δεδομένο σύνολο συνιστωσών κόστους. Επισημαίνεται ότι, όπως προκύπτει από την εξίσωση 2.12, η βέλτιστη ταχύτητα κοπής είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος της παρτίδας και τους μη παραγωγικούς χρόνους.



Σχήμα 2-3 Μεταβολή του μοναδιαίου κόστους σε συνάρτηση με την ταχύτητα κοπής για διαμήκη τόννευση

Για να βρεθεί η ταχύτητα κοπής που δίνει το μέγιστο ρυθμό παραγωγής ή ισοδύναμα τον ελάχιστο χρόνο παραγωγής ακολουθείται μια παρόμοια διαδικασία. Σε αυτή την περίπτωση, αθροίζοντας τους επιμέρους χρόνους των βημάτων της κατεργασίας κοπής, προκύπτει ότι ο μέσος χρόνος παραγωγής ανά τεμάχιο δίνεται από τη σχέση:

$$t_{pr} = t_l + t_m + \frac{N_l}{N_b} t_{ct} \quad (2.13)$$

Η αντικατάσταση των εξισώσεων 2.8 και 2.9 στη 2.13 και η παραγωγή της σχέσης που προκύπτει δίνει την ταχύτητα κοπής που αντιστοιχεί στον ελάχιστο χρόνο παραγωγής. Οπότε έχουμε τη σχέση:

$$V_p = V_r \left( \frac{n}{1-n} \frac{t_r}{t_{ct}} \right)^n \quad (2.14)$$

Η σύγκριση των 2.12 και 2.14 δείχνει ότι η εφαρμογή των κριτηρίων για το ελάχιστο κόστος και τον ελάχιστο χρόνο παραγωγής οδηγεί σε διαφορετικές λύσεις και επομένως η τελική επιλογή της ταχύτητας κοπής απαιτεί ένα συμβιβασμό.

### 2.2.4.3.3 Διάρκεια ζωής κοπτικού για ελάχιστο κόστος και ελάχιστο χρόνο παραγωγής

Για πρακτικούς λόγους είναι χρήσιμο να βρεθούν εκφράσεις για τη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου που αντιστοιχούν στο ελάχιστο κόστος  $t_c$  και τον ελάχιστο χρόνο παραγωγής  $t_p$ . Αυτές οι εκφράσεις προκύπτουν από απλές αντικαταστάσεις των εξισώσεων 2.12 και 2.14 στη σχέση Taylor. Τελικά καταλήγουμε στις σχέσεις:

$$t_c = \frac{1-n}{n} \left( t_{ct} + \frac{C_t}{M} \right) \quad (2.15)$$

Και

$$t_p = \left( \frac{1-n}{n} \right) t_{ct} \quad (2.16)$$

Για πρακτική χρήση ο παράγοντας  $(1-n)/n$  στις 2.15 και 2.16 παίρνει την τιμή 7 για κοπτικά από ταχυχάλυβα, 3 για κοπτικά από καρβίδια και 1 για κοπτικά από οξειδία ή κεραμικά. Με τις τιμές αυτές οι κατά προσέγγιση εκφράσεις για τη βέλτιστη ζωή των εργαλείων για τα διάφορα υλικά κοπτικών εργαλείων τροποποιούνται ως εξής:

Για κοπτικά από ταχυχάλυβα:  $t_c = 7 \left( t_{ct} + \frac{C_t}{M} \right) \quad (2.17)$

$$t_p = 7 t_{ct} \quad (2.18)$$

Για κοπτικά από καρβίδια:  $t_c = 3 \left( t_{ct} + \frac{C_t}{M} \right) \quad (2.19)$

$$t_p = 3 t_{ct} \quad (2.20)$$

Για κοπτικά από οξειδία ή κεραμικά:  $t_c = t_{ct} + \frac{C_t}{M} \quad (2.21)$

$$t_p = t_{ct} \quad (2.22)$$

Οι αντίστοιχες βέλτιστες ταχύτητες κοπής μπορούν να βρεθούν από τις σχέσεις:

$$V_c = V_r \left( \frac{t_r}{t_c} \right)^n \quad (2.23)$$

Και

$$V_p = V_r \left( \frac{t_r}{t_p} \right)^n \quad (2.24)$$

Από τις εξισώσεις αυτές γίνεται σαφές ότι για να επιλεγούν οι βέλτιστες συνθήκες κοπής είναι απαραίτητο να είναι γνωστός ο χρόνος αλλαγής του εργαλείου  $t_{ct}$ , το κόστος  $C_t$ , η δαπάνη  $M$  μηχανών και χειριστών και η ταχύτητα κοπής  $V_r$ , για μια συγκεκριμένη ζωή των εργαλείων  $t_r$ .

#### 2.2.4.3.4 Εκτίμηση των άλλων παραγόντων κοπής ( $M$ , $C_t$ )

Το κόστος εργαλειομηχανών και χειριστών ( $M$ ), περιλαμβάνει το ποσό αμοιβής του χειριστή συν τα γενικά έξοδα που συνδέονται με την απασχόλησή του και το χρόνο απόσβεσης της εργαλειομηχανής συν τα γενικά έξοδα που συνδέονται με τη χρήση της. Η μέθοδος υπολογισμού αυτών των δαπανών ποικίλλει από εργοστάσιο σε εργοστάσιο, αλλά η ακόλουθη έκφραση ισχύει στις περισσότερες περιπτώσεις:

$$M = W_o + (\text{επί τοις εκατό γενικά έξοδα χειριστή} / 100) W_o + M_i (\text{επί τοις εκατό γενικά έξοδα μηχανής} / 100) M_i \quad (2.25)$$

όπου  $W_o$  είναι το κόστος εργατοώρας και το  $M_i$  είναι ο ρυθμός απόσβεσης της εργαλειομηχανής. Τα γενικά έξοδα των χειριστών μπορούν να ποικίλουν μεταξύ 100%-300% και περιλαμβάνουν τις πρόσθετες παροχές του εργαζομένου, το κόστος χρήσης του χώρου εργασίας και το κόστος διοικητικών υπηρεσιών. Οι δαπάνες των μηχανών περιλαμβάνουν το κόστος ενέργειας που καταναλώνεται από την εργαλειομηχανή, το κόστος συντήρησής της και ενδεχομένως το κόστος παροχής θέσης για την εργαλειομηχανή.

Συνήθως για τον υπολογισμό του ρυθμού απόσβεσης των εργαλειομηχανών γίνεται δεκτό ότι η αρχική αξία τους θα αποσβεσθεί μετά από ορισμένα έτη. Αυτή η περίοδος μπορεί να ποικίλει από 2 έως 10 έτη, ανάλογα με τον τύπο της μηχανής και τη φορολογική νομοθεσία. Μια πρώτη προσέγγιση του ρυθμού απόσβεσης της εργαλειομηχανής δίνεται από τη σχέση:

$$M_i = \text{Αρχικό κόστος μηχανής} / (\text{Αριθμός εργατοωρών} \cdot \text{Περίοδος απόσβεσης}) \quad (2.26)$$

Η σχέση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του κόστους των εργαλείων εξαρτάται από τον τύπο του χρησιμοποιούμενου εργαλείου. Για τα επανατροχιζόμενα εργαλεία χρησιμοποιείται η σχέση:

$$C_t = \text{Κόστος τροχίσεως} + (\text{Κόστος εργαλείου} / \text{Μέσος όρος πιθανών επανατροχίσεων}) \quad (2.27)$$

Σημειώνεται ότι στην πράξη ο πραγματικός αριθμός επανατροχίσεων μπορεί να είναι μικρότερος από το ήμισυ του θεωρητικού αριθμού.

Για τα μη επανατροχιζόμενα εργαλεία, το κόστος ενός κοπτικού υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$C_t = (\text{Κόστος ένθετου πλακιδίου} / \text{Μέσος αριθμός χρησιμοποιούμενων κοπτικών ακμών ανά ένθετο}) + (\text{Κόστος στελέχους} / \text{Αριθμός χρησιμοποιούμενων κοπτικών ακμών κατά τη διάρκεια ζωής του στελέχους}) \quad (2.28)$$

Ο χρόνος αλλαγής εργαλείου είναι ο χρόνος που απαιτείται για να αφαιρεθεί το κοπτικό εργαλείο από τη μηχανή, να τοποθετηθεί ένα νέο εργαλείο στη μηχανή, να τεθεί το νέο εργαλείο στη σωστή θέση του και να επανεκκινήσει η κοπή. Εάν χρησιμοποιηθεί ένα μη επανατροχιζόμενο εργαλείο, ισχύει η σχέση:

$$t_{ct} = [(\text{χρόνος τοποθέτησης πλακιδίου στροφής}) \cdot (\text{αριθμός κοπτικών ακμών ανά πλακίδιο} - 1) + (\text{χρόνος αντικατάστασης πλακιδίου})] / (\text{αριθμός κοπτικών ακμών ανά πλακίδιο}) \quad (2.29)$$

Η ταχύτητα κοπής  $V_f$  για μια συγκεκριμένη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου  $t_r$ , εξαρτάται από το υλικό του εργαλείου, τη μορφή του εργαλείου, το υλικό εργασίας και τις συνθήκες κοπής. Οι τιμές του  $V_f$  υπολογίζονται με βάση τη σταθερά  $C$ , και για τα διάφορα υλικά κοπτικών κατά κανόνα περιέχονται σε εγχειρίδια κατεργασιμότητας υλικών (Machinability Handbooks).

### 2.2.3.5 Κοπή μέγιστης απόδοσης

Από τα προηγούμενα είναι φανερό ότι αν σε μια κατεργασία έχουν επιλεγεί όροι ελάχιστου κόστους, τότε ο χρόνος παραγωγής θα είναι μεγαλύτερος από τον ελάχιστο. Επίσης, όταν επιλέγονται συνθήκες για ελάχιστο χρόνο παραγωγής, το κόστος παραγωγής θα είναι υψηλότερο από το ελάχιστο. Για να υπάρξει συμβιβασμός μεταξύ αυτών των δύο περιπτώσεων προτάθηκε το κριτήριο του μέγιστου ποσοστού κέρδους.

Εάν  $S$  είναι το χρηματικό ποσό που η εταιρεία εισπράττει για κάθε τεμάχιο που κατεργάζεται στην εργαλειομηχανή, το κέρδος ανά τεμάχιο δίνεται από τη διαφορά  $S - C_{pr}$  και ο ρυθμός κέρδους δίνεται από τη σχέση:

$$P_r = \frac{S - C_{pr}}{t_{pr}} \quad (2.30)$$

Αντικαθιστώντας τα  $C_{pr}$  και το  $t_{pr}$  από τις σχέσεις 2.11 και 2.13 αντίστοιχα προκύπτει:

$$P_r = \frac{S - M_t - MKV^{-1} - KV_r^{-1/n} t_r^{-1} (Mt_{ct} + C_t) V^{(1-n)/n}}{t_l + KV^{-1} + KV_r^{-1/n} t_r^{-1} t_{ct} V^{(1-n)/n}} \quad (2.31)$$

Εάν η εξίσωση 2.31 διαφορισθεί ως προς το  $V$ , το διαφορικό που προκύπτει εξισωθεί με μηδέν και συνδυαστεί με τη 2.7, τότε λαμβάνεται η διάρκεια ζωής των εργαλείων  $t_{ef}$  για τη μέγιστη αποδοτικότητα με τη μορφή:

$$t_{ef} = \frac{1-n}{n} \left( t_{ct} + \frac{t_l C_t}{S} \right) + \frac{C_t K}{n S V_r} \left( \frac{t_{ef}}{t_r} \right)^n \quad (2.32)$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να λυθεί μόνο με αριθμητικές μεθόδους. Εύκολα διαπιστώνεται ότι η εξίσωση 2.32 είναι ανεξάρτητη από την παράμετρο  $M$ . Η δυνατότητα να καθοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες κατεργασίας χωρίς γνώση του  $M$  είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην πράξη δεδομένης της αβεβαιότητας στην εκτίμηση της παραμέτρου  $M$ .



## Κεφάλαιο 3

### 3.1 Περιγραφή της μεθόδου διαμελισμού (partitioning)

#### Εισαγωγή

Η απόδοση ενός συστήματος καθορίζεται από μεταβλητές που ανήκουν σε διαφορετικά επιστημονικά πεδία. Κάποιες από αυτές σχετίζονται με τη μικροδομή των υλικών, άλλες με το σχήμα και την αρχιτεκτονική των συστατικών του συστήματος και άλλες στα θερμικά, μηχανικά και χημικά φορτία των συστατικών. Ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση του συστήματος απαιτεί εκτίμηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ αυτών των μεταβλητών. Θα παρουσιάσουμε πως ένα σύστημα μπορεί να υποδιαιρεθεί σε μικρότερα υποσυστήματα και πως αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω κάποιων συνδετικών μεταβλητών (linking variables). Τελικός σκοπός είναι να καταλήξουμε σε κάποιες σχέσεις που θα μας δίνουν τα πλαίσια μέσα στα οποία μπορούμε να κινηθούμε για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος.

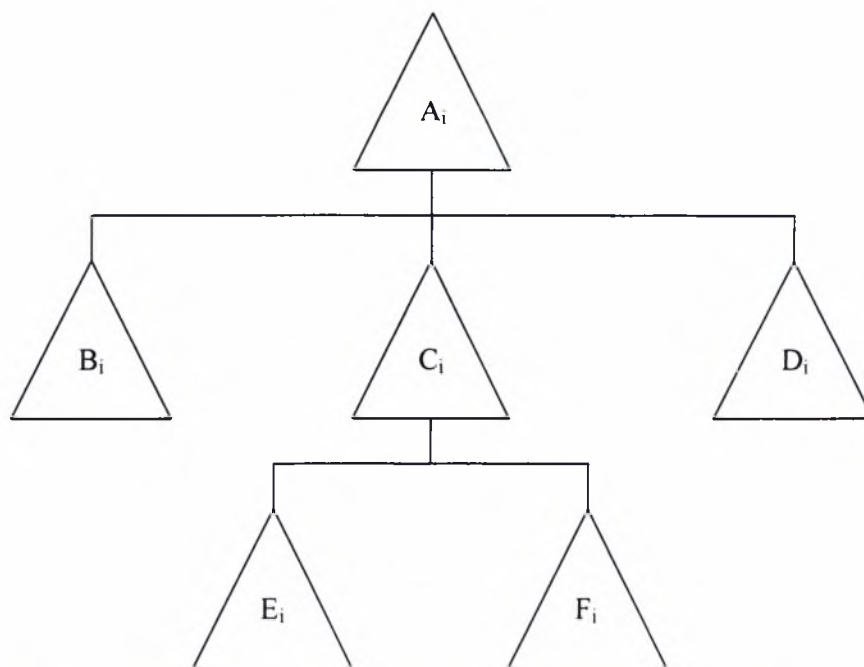
Σημαντικό βήμα για την ανάπτυξη της μεθόδου είναι η διασάφηση των συναρτήσεων που παρέχουν μία ομαδοποίηση με φυσική έννοια των μεταβλητών. Πρέπει να αναπτυχθεί όσο περισσότερο γίνεται μια ιεράρχηση των συναρτήσεων που θα μας επιτρέψει το διαμελισμό του συστήματος σε υποσυστήματα, τα οποία μπορούν να αναλυθούν περαιτέρω ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, προτού θεωρήσουμε μη ιεραρχικό διαμελισμό σε μικρότερα υποσυστήματα που θα έχουν κοινές μεταβλητές. Με άλλα λόγια πρέπει να γίνει πρώτα μια αναγνώριση του συστήματος και των υποσυστημάτων που το αποτελούν και να καταγραφούν οι συναρτήσεις που περιγράφουν τη σχέση του κάθε υποσυστήματος σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό. Στη συνέχεια πρέπει να συγκεντρώσουμε τις υπάρχουσες σχέσεις και να τις ομαδοποιήσουμε με μαθηματικά κριτήρια αναδεικνύοντας νέα υποσυστήματα, μη ιεραρχικά.

#### 3.1.1 Ιεραρχική δομή

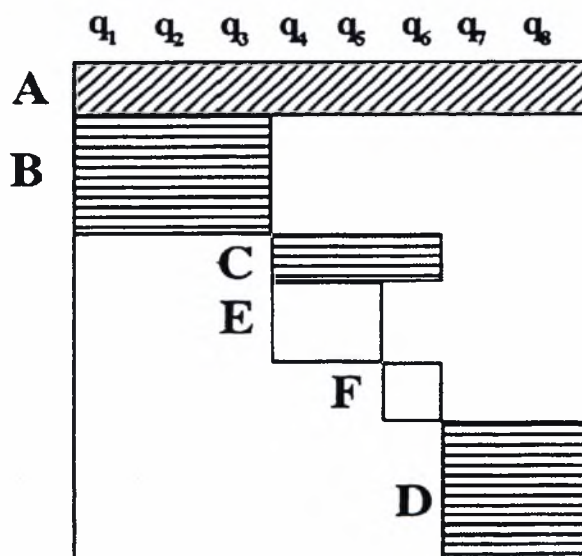
Στα διαγράμματα ροής συμβολίζουμε τα ιεραρχικά συστήματα με τρίγωνα και τις συναρτήσεις που περιγράφουν τις ιδιότητες κάθε συστήματος με  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  κτλ., όπου

το κεφαλαίο γράμμα αναφέρεται σε κάποιο συγκεκριμένο σύστημα ή υποσύστημα και ο δείκτης  $i$  συμβολίζει τις συναρτήσεις για το αντίστοιχο σύστημα ή υποσύστημα. Οι μεταβλητές του συστήματος συμβολίζονται με  $q_j$ , όπου οι συναρτήσεις  $A$  περιγράφονται από ένα συγκεκριμένο εύρος  $j$ , οι συναρτήσεις  $B$  από ένα άλλο εύρος  $j$  κτλ. Ένα παράδειγμα ιεράρχησης φαίνεται στο σχήμα 3.1. Όπως φαίνεται το σύστημα  $A$  υποδιαιρείται στα υποσυστήματα  $B$ ,  $C$  και  $D$ , ενώ το  $C$  υποδιαιρείται από τα συστήματα  $E$  και  $F$ . Χαρακτηριστικό γνώρισμα της συγκεκριμένης ιεράρχησης είναι ότι σε όλα τα επιμέρους επίπεδα τα υποσυστήματα δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, επομένως οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των ιδιοτήτων ενός υποσυστήματος δεν είναι κοινές με μεταβλητές άλλου υποσυστήματος που ανήκει στο ίδιο επίπεδο. Η μήτρα του σχήματος 3.2 φανερώνει τις εξαρτήσεις των συναρτήσεων του συστήματος με τις μεταβλητές του συστήματος. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα υποθέτουμε ότι έχουμε οχτώ μεταβλητές. Αυτό που παρατηρούμε στην ιεραρχική υποδιαίρεση των υποσυστημάτων είναι ότι οι συναρτήσεις των υποσυστημάτων σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο αντιστοιχούν σε διαφορετικές ομάδες μεταβλητών. Έτσι, τα  $B$ ,  $C$  και  $D$  δίνονται από τα  $B_i$  ( $q_1, q_2, q_3$ ),  $C_i$  ( $q_4, q_5, q_6$ ) και  $D_i$  ( $q_7, q_8$ ) αντίστοιχα.

Επίσης παρατηρούμε ότι συναρτήσεις του συστήματος που βρίσκονται σε υψηλό επίπεδο ιεράρχησης εξαρτώνται από τις μεταβλητές όλων των συναρτήσεων που βρίσκονται στα χαμηλότερα επίπεδα. Έτσι οι συναρτήσεις  $A$  δίνονται από τα  $A_i$  ( $q_1 \dots q_8$ ) ενώ τα  $E$  και  $F$  είναι συναρτήσεις που συνδέονται μόνο με τα  $q_4$  και  $q_5$  και  $q_6$  αντίστοιχα στο συγκεκριμένο παράδειγμα.



Σχήμα 3-1 Ιεραρχικός διαμελισμός ενός συστήματος σε υποσυστήματα

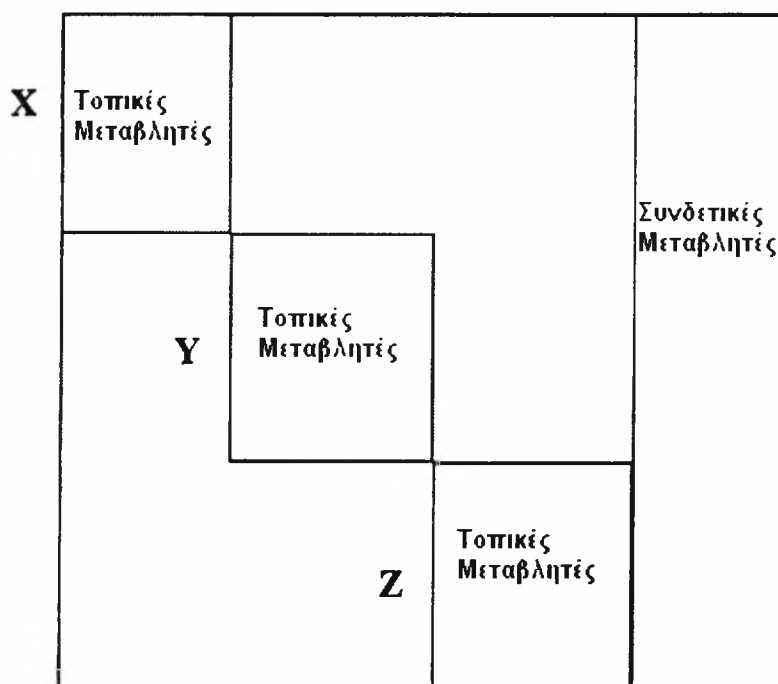


Σχήμα 3-2 Μήτρα συναρτήσεων και μεταβλητών που προκύπτει από τον ιεραρχικό διαμελισμό

### 3.1.2 Μη-ιεραρχική δομή

Αυτά όσον αφορά τον ιεραρχικό διαμελισμό του συστήματος. Πλέον θα ασχοληθούμε με το μη ιεραρχικό διαμελισμό, που είναι σχεδόν πάντα απαραίτητος

για την ενσωμάτωση μεταβλητών που ανήκουν στο πεδίο της επιστήμης υλικών στην ανάλυση συστημάτων. Κύριο γνώρισμα του μη ιεραρχικού διαμελισμού είναι ότι εμφανίζονται δύο ειδών μεταβλητές: τοπικές μεταβλητές που περιγράφουν συναρτήσεις συγκεκριμένων υποσυστημάτων και συνδετικές μεταβλητές που μοιράζονται από κοινού από τα υποσυστήματα. Η μορφή της μήτρας ενός μη ιεραρχικού συστήματος φαίνεται στο σχήμα 3. Όπως βλέπουμε οι συναρτήσεις των υποσυστημάτων X, Y και Z δεν υποδιαιρούνται πλήρως, αλλά έχουν κοινές κάποιες συνδετικές μεταβλητές. Δεν υπάρχει ένας και μοναδικός τρόπος για να υποδιαιρέσουμε ένα σύστημα σε τοπικές και γενικές μεταβλητές.

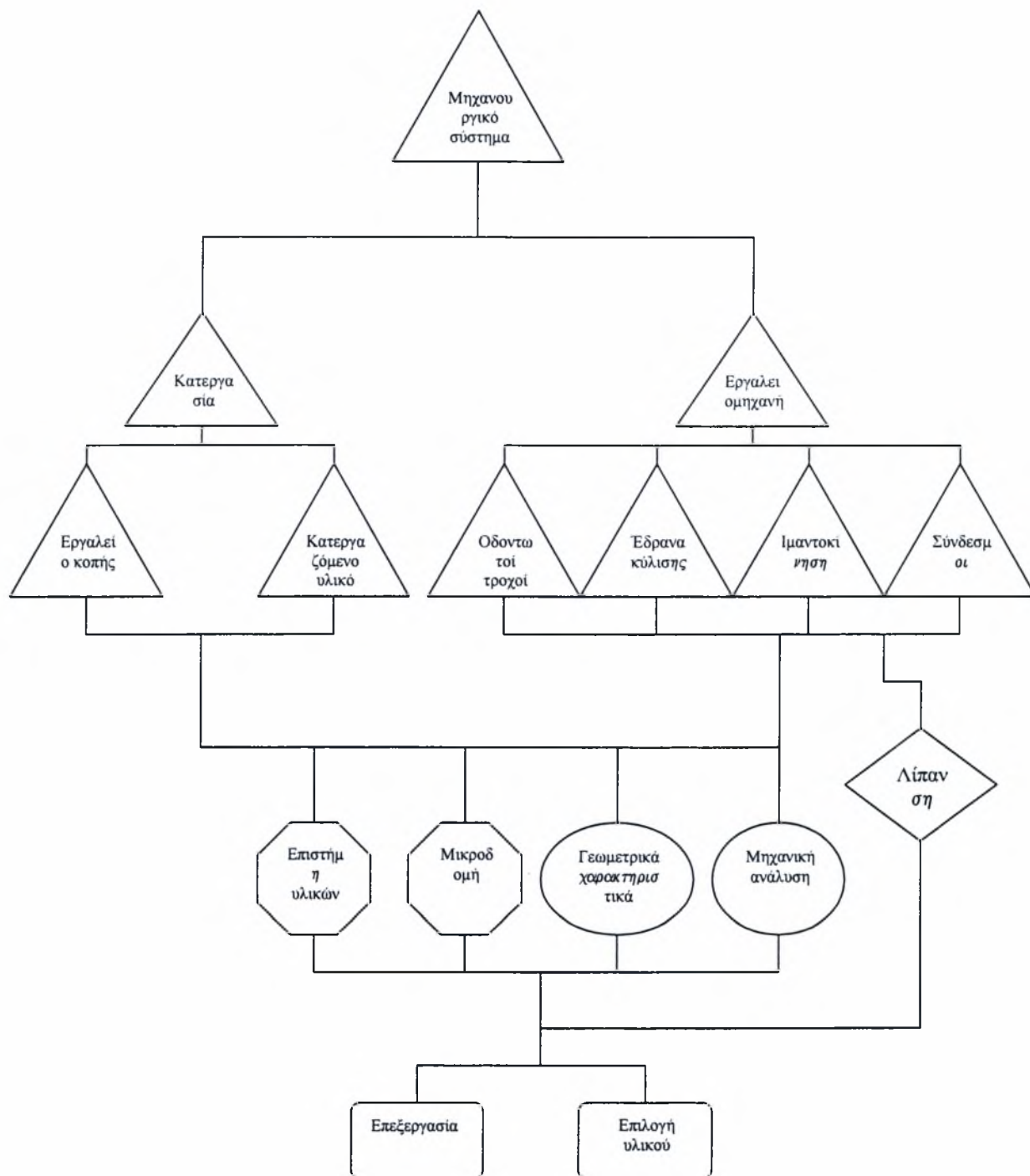


Σχήμα 3-3 Μήτρα μη-ιεραρχικού διαμελισμού

### 3.1.3 Αναγνώριση συστήματος

Πρώτο στάδιο πριν την εφαρμογή της μεθόδου είναι η αναγνώριση του υπό εξέταση συστήματος και των υποσυστημάτων του. Αυτό θα μας βοηθήσει στην εξέταση του συστήματος εργαλειομηχανή - κατεργασία και στο πρώτο στάδιο της μεθόδου που είναι η συλλογή μεταβλητών και συναρτήσεων οι οποίες περιγράφουν τη λειτουργία του συστήματος και των υποσυστημάτων του. Η αναγνώριση πρέπει να γίνει ιεραρχικά και σύμφωνα με τους κανόνες που περιγράφηκαν προηγουμένως. Όταν

πλέον θα έχουμε μια αρχική εικόνα του συστήματος, θα είναι πιο εύκολο να συλλέξουμε τις συναρτήσεις και τις μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν. Όσο αφορά το σύστημα κατεργασία - εργαλειομηχανή, μια αρχική ιεραρχική αναγνώριση φαίνεται στο σχήμα 3.4. Βέβαια από ένα σημείο και μετά δεν έχουμε ιεραρχική δομή του συστήματος.



**Σχήμα 3-4 Ιεραρχική δομή μηχανουργικού συστήματος**

Όπως φαίνεται και στο σχήμα το μηχανουργικό σύστημα χωρίζεται σε δύο ιεραρχικά υποσυστήματα, το υποσύστημα της κατεργασίας και το υποσύστημα της εργαλειομηχανής. Το υποσύστημα της κατεργασίας χωρίζεται σε δύο περαιτέρω υποσυστήματα και πάλι ιεραρχικά, το εργαλείο κοπής και το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Επίσης βλέπουμε ότι το υποσύστημα της εργαλειομηχανής χωρίζεται σε τέσσερα υποσυστήματα, αποτελούμενα από μέρη της εργαλειομηχανής.

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι θα μπορούσαν να είχαν συμπεριληφθεί και άλλα μέρη της εργαλειομηχανής, αλλά παραλήφθηκαν καθώς θεωρήσαμε ότι δεν έχουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση του μηχανουργικού συστήματος. Για παράδειγμα οι ευθυντήριες γλίστρες θεωρητικά φθείρονται από διάφορους μηχανισμούς και η φθορά τους μπορεί να υπολογιστεί από μαθηματικές σχέσεις. Συγκεκριμένα, ανάλογα με το σχεδιασμό τους και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες λειτουργούν οι ευθυντήριες γλίστρες, είναι πιθανόν να εμφανιστεί τριβή ικανή να προκαλέσει φθορά. Κύριος παράγοντας για την πρόκληση φθοράς είναι η ανεπαρκής λίπανση και προστασία από κάποιο κάλυμμα (ανοιχτές γλίστρες). Έτσι οι γλίστρες είναι εκτεθειμένες σε ρινίσματα και ακαθαρσίες. Ο τύπος που δίνει τη φθορά στις γλίστρες είναι ο εξής:

$$U_{sl} = k_{sl} I_1 L_{sl} (\gamma_{1sl} p_{1sl} + \gamma_{2sl} \gamma_{3sl} p_{2sl}) \quad (3.1)$$

Όπου: $U_{sl}$	Μέση φθορά στο πιο φθαρμένο σημείο
$L_{sl}$	Συνολικό μήκος
$I_1$	Γραμμική φθορά στο σύστημα της κίνησης κοπής
$k_{sl}$	Λόγος πραγματικής μέγιστης φθοράς κατά μήκος της γλίστρας προς τη θεωρητική
$p_{1sl}, p_{2sl}$	Μέση πίεση στο πρώτο και στο δεύτερο σύστημα κίνησης αντίστοιχα

$$\gamma_{1sl} = \frac{L_1}{L}, \gamma_{2sl} = \frac{L_2}{L}, \gamma_{3sl} = \frac{k_{2sl} f_2}{k_{1sl} f_1}$$

Η φθορά που προκαλείται στις γλίστρες δίνεται θεωρητικά από τον παραπάνω τύπο. Όμως η χρήση υδροστατικών και αεροστατικών διαδρομών σε συνδυασμό με τη χρήση κάποιου καλύμματος ελαχιστοποιούν τη φθορά. Επίσης σε ορισμένες



εργαλειομηχανές, όπως σε αυτή του εργαστηρίου, ρυθμίζοντας τις συντεταγμένες των συστημάτων κίνησης επαναφέρεται η επιθυμητή λειτουργία και γίνεται αντιστάθμιση της φθοράς. Οπότε οποιαδήποτε φθορά έχει δημιουργηθεί δεν παίζει κανένα ρόλο. Για τους λόγους που αναλύθηκαν παραπάνω θεωρούμε τη φθορά στις γλίστρες αμελητέα ποσότητα.

Επανερχόμενοι στην αναγνώριση του συστήματος, βλέπουμε ότι μετά τα δύο πρώτα επίπεδα προχωράμε σε μη ιεραρχική δομή. Αυτό δικαιολογείται από τη λογική ότι η απόδοση των τελευταίων ιεραρχικών υποσυστημάτων εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των συναρτήσεων που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία τους. Στο σύστημα της εργαλειομηχανής, βλέπουμε πόσο σημαντικό ρόλο παίζει η επιλογή του λιπαντικού στα διάφορα μέρη της. Τα λιπαντικά που χρησιμοποιούνται σε ορισμένες κρίσιμες εφαρμογές μπορούν να θεωρηθούν ως δομικά (κατασκευαστικά υλικά), οι ιδιότητες των οποίων επιδρούν στη λειτουργικότητα των τριβόμενων μερών στον ίδιο βαθμό με τα υλικά από τα οποία αυτά αποτελούνται.

Στο διάγραμμα ροής του σχήματος 3.4 χρησιμοποιούμε το οκτάγωνο για τις συναρτήσεις που σχετίζονται με τις ιδιότητες του υλικού. Οι συναρτήσεις αυτές αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, αφού πρόκειται ουσιαστικά για τις θεμελιώδεις ιδιότητες του επιλεγμένου υλικού. Με κύκλο έχουμε ομαδοποιήσει τις γεωμετρικές ιδιότητες και τις συναρτήσεις που προκύπτουν από τη μηχανική ανάλυση, καθώς προκύπτει ότι υπάρχει στενή αλληλεπίδραση. Όπως φαίνεται αυτές οι ομάδες συναρτήσεων μοιράζονται μεταβλητές με τα υποσυστήματα της κατεργασίας, αλλά και με τα μέρη της μηχανής. Για να καταδείξουμε τον κρίσιμο ρόλο του λιπαντικού έχουμε κατατάξει τις συναρτήσεις που το περιγράφουν σε ρόμβο που συνδέεται με όλα τα μέρη της εργαλειομηχανής. Τέλος τα δύο ορθογώνια στη βάση του διαγράμματος διακρίνουν δύο ευρείς τομείς: την επιλογή υλικού και την επεξεργασία που λαμβάνει μέρος. Οι δύο αυτοί τομείς μοιράζονται μεταβλητές με όλα τα ιεραρχικά δομημένα υποσυστήματα.

### **3.1.4 Η μέθοδος του διαμελισμού (Partitioning)**

Η απόδοση ενός συστήματος καθορίζεται από διάφορες μεταβλητές, όπως είπαμε και προηγουμένως.. Σε ένα σύστημα κατεργασίας-εργαλειομηχανής οι μεταβλητές αυτές που παίζουν κύριο ρόλο προέρχονται από διάφορα επιστημονικά πεδία. Συνολικά στην παρούσα μελέτη συναντούμε μεταβλητές που καθορίζουν θεμελιώδεις

φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του υλικού, όπως σκληρότητα και συντελεστή θερμοδιαχυτότητας, γεωμετρικές μεταβλητές, μεταβλητές που αφορούν ιδιότητες της μικροδομής του υλικού, μεταβλητές που εντάσσονται στην επιστήμη των υλικών, μεταβλητές που προέρχονται από τη μηχανική ανάλυση και μεταβλητές απόδοσης. Η βελτιστοποίηση του συστήματος κατεργασία-εργαλειομηχανή συνίσταται στην εκτίμηση και διασάφηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ αυτών των μεταβλητών.

Σύμφωνα με τη μέθοδο του «διαμελισμού» (**partitioning**), που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία προκύπτουν διάφορα υποσυστήματα ως υποδιαιρέσεις του κυρίως συστήματος κατεργασίας-εργαλειομηχανής και η έρευνα επικεντρώνεται στις μεταβλητές που χρησιμεύουν ως συνδετικοί κρίκοι μεταξύ των υποσυστημάτων (**linking variables**). Τα επιμέρους συστήματα αλληλεπιδρούν μέσω αυτών των μεταβλητών. Βέβαια ο τρόπος διαμελισμού δεν μπορεί να είναι ένας και μοναδικός. Η επιλογή των υποσυστημάτων είναι μια υποκειμενική διαδικασία.

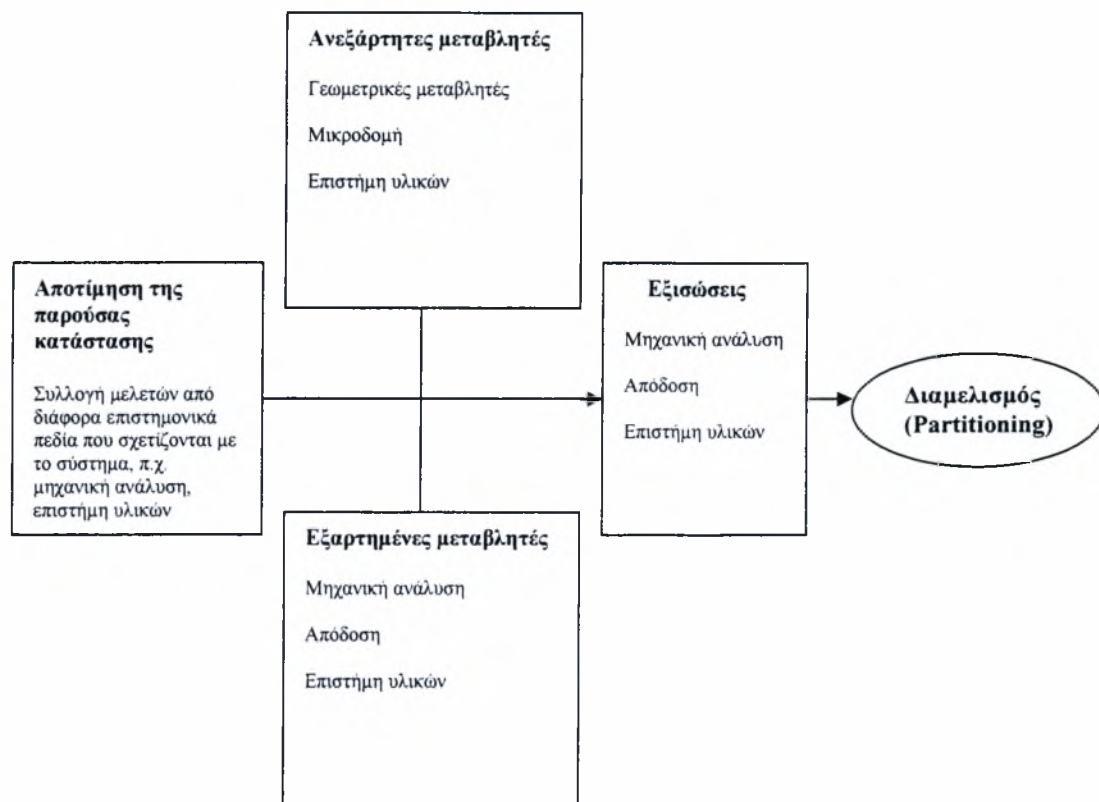
Το τελικό αποτέλεσμα θα μας οδηγήσει σε σχέσεις οι οποίες με τη χρήση στατιστικών μεταβλητών θα μας δώσουν χρήσιμες πληροφορίες για τις παραμέτρους που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος και πεδία τιμών εντός των οποίων μπορούμε να κινηθούμε ώστε να έχουμε επιθυμητές τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών.

Η μεθοδολογία που θα ακολουθήσουμε συνοψίζεται σε τρεις φάσεις. Στην πρώτη φάση συλλέγουμε μεταβλητές και σχέσεις που σχετίζονται με το σύστημα κατεργασίας -εργαλειομηχανής και διαχωρίζουμε τις μεταβλητές σε εξαρτημένες και ανεξάρτητες. Όπως θα δούμε και στη συνέχεια, ως ανεξάρτητες μεταβλητές θεωρούμε κατά κύριο λόγο αυτές που σχετίζονται με την επιλογή του υλικού, το σχεδιασμό της μικροδομής και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Οι εξαρτημένες μεταβλητές συνδέουν την απόδοση του συστήματος με τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Η πρώτη φάση απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 3.5.

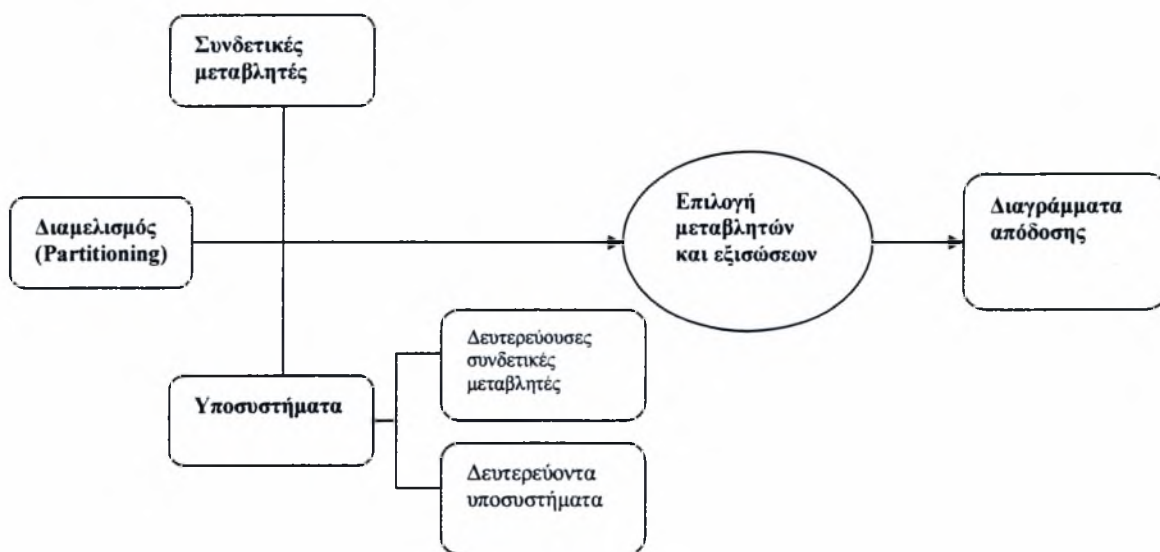
Στη δεύτερη φάση προχωρούμε στο διαμελισμό (partitioning) των μεταβλητών σε υποσυστήματα και σε συνδετικές μεταβλητές (linking variables). Ο διαμελισμός μπορεί να γίνει σε υποσυστήματα μέχρι να προκύψει ένα υποσύστημα εξισώσεων που θα χρησιμοποιηθεί ως βάση για την ανάλυση της απόδοσης του συστήματος. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται σχηματικά στο διάγραμμα ροής στο σχήμα 3.6.

Στην τελική φάση τα υποσυστήματα αναλύονται ώστε να πετύχουμε συγκεκριμένα αποτελέσματα σε επίπεδο συστήματος. Τα αποτελέσματα αυτά μπορεί να

περιλαμβάνουν βελτιστοποίηση της διάρκειας ζωής και του συντελεστή χρήσης της εργαλειομηχανής.



Σχήμα 3-5 Η διαδικασία συλλογής και ομαδοποίησης εξισώσεων και μεταβλητών



Σχήμα 3-6 Η διαδικασία του διαμελισμού σε υποσυστήματα και η επιλογή των μεταβλητών και εξισώσεων για ανάλυση σε επίπεδο συστήματος

### 3.1.5 Πρώτη φάση: Συλλογή και ομαδοποίηση μεταβλητών και εξισώσεων

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα ροής του σχήματος 3.5, οι μεταβλητές του προβλήματος χωρίζονται σε ανεξάρτητες και εξαρτημένες. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές συνήθως καθορίζουν τις βασικές παραμέτρους του προβλήματος, όπως για παράδειγμα την επιλογή των υλικών για το εργαλείο κοπής και το κομμάτι που κατεργάζεται και συνεπώς τις μικροσκοπικές ιδιότητες τους. Επίσης στην παρούσα εργασία υποθέτουμε ότι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου και του κομματιού είναι σταθερά, επομένως μεταβλητές που σχετίζονται με γεωμετρικές ιδιότητες λαμβάνονται ως ανεξάρτητες.

Οι ανεξάρτητες μεταβλητές διακρίνονται σε μεταβλητές που χαρακτηρίζουν τις θεμελιώδεις ιδιότητες του υλικού, μεταβλητές που σχετίζονται με τη μικροδομή και τέλος σε μεταβλητές που περιγράφουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Οι εξαρτημένες μεταβλητές συνδέονται με τις ανεξάρτητες μέσω συναρτήσεων. Σε γενικές γραμμές οι εξαρτημένες μεταβλητές μπορούν να υποδιαιρεθούν σε τρεις κατηγορίες: μεταβλητές επιστήμης υλικών, μηχανικής ανάλυσης και απόδοσης.

Οι μεταβλητές της επιστήμης υλικών περιγράφουν τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών σε σχέση με τις θεμελιώδεις ιδιότητές τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η σκληρότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας του υλικού η οποία εξαρτάται από τη μικροδομή του υλικού και από θεμελιώδεις ιδιότητές του όπως ο συντελεστής θερμοδιαχυτότητας. Στη μηχανική ανάλυση σκοπός είναι να αναγνωρίσουμε ιδιότητες της διαδικασίας συναρτήσει κάποιων βασικών ιδιοτήτων της κατεργασίας, όπως η δύναμη που ασκείται στο εργαλείο συναρτήσει της ταχύτητας κοπής και του ρυθμού αφαίρεσης υλικού.

Οι συναρτήσεις του συστήματος κατεργασίας-εργαλειομηχανής περιγράφουν τις σχέσεις μεταξύ εξαρτημένων και ανεξάρτητων μεταβλητών. Επομένως η ταξινόμηση των συναρτήσεων ακολουθεί την ταξινόμηση των εξαρτημένων μεταβλητών σε συναρτήσεις που περιγράφουν ιδιότητες υλικού, σε συναρτήσεις που περιγράφουν τη μηχανική συμπεριφορά του συστήματος και σε συναρτήσεις που σχετίζονται με την απόδοση του συστήματος.

Οι μεταβλητές και οι εξισώσεις δίνονται στον πίνακα 3.1 και στον πίνακα 3.2 αντίστοιχα. Στην επόμενη παράγραφο προχωρούμε στο διαμελισμό των μεταβλητών και των συναρτήσεων που είναι η δεύτερη φάση της μεθόδου που χρησιμοποιούμε. Όπως θα δούμε, οι συνδετικές μεταβλητές παρέχουν το μηχανισμό για να συνδέσουμε τα υποσυστήματα μεταξύ τους και βοηθούν στο να αποκτήσουμε βαθύτερη φυσική ενόραση στη σχέση μεταξύ του αντικειμένου της επιστήμης υλικών και της μηχανικής (φυσικής) απόδοσης του συστήματος.

## Πίνακας Μεταβλητών

### ΘΕΡΜΙΚΕΣ

$T_f$	Στιγμιαία θερμοκρασία εργαλείου κοπής
$T_F$	Μέση θερμοκρασία της επιφάνειας επαφής αποβλήτου-εργαλείου
$S_T$	Λόγος απαγόμενης θερμότητας προς τη δημιουργούμενη θερμότητα λόγω τριβών στο μειωτή στροφών
$T_\xi$	Θερμοκρασία
$T_m$	Θερμοκρασία τήξης
$\Delta T$	Κρίσιμη διαφορά θερμοκρασίας
$T_o$	Μέση θερμοκρασία εργαλείου κοπής
$t_m$	Χρόνος που χρειάζεται το υλικό για να αρχίσει να λιώνει κάτω από σταθερή ροή θερμότητας
$q_l$	Ροή θερμότητας
$T$	Θερμοκρασία
$\theta_o$	Αρχική θερμοκρασία
$S_T$	Λόγος απαγόμενης θερμότητας προς τη δημιουργούμενη θερμότητα λόγω τριβών στο μειωτή στροφών
$\theta_\xi$	Θερμοκρασία
$k_f$	Παράγοντας θερμοκρασίας
$\Theta_1$	Θερμοκρασία σώματος 1
$\Theta_2$	Θερμοκρασία σώματος 2

## ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΚΕΣ

$R_a$	Τραχύτητα επιφάνειας
$\gamma$	Ρυθμός φθοράς σε μηχανικά μέρη
$f_0(\gamma)$	Συνάρτηση πυκνότητας- πιθανότητας φθοράς
$\gamma_{1-2}^{\delta}$	Ρυθμός φθοράς για δισκοειδείς επιφάνειες λαμβάνοντας υπόψη την πίεση στην τριβόμενη επιφάνεια
$\gamma_{1-2}^k$	Ρυθμός φθοράς για κωνικές επιφάνειες λαμβάνοντας υπόψη την πίεση στην τριβόμενη επιφάνεια
$\gamma_{1-2}^{\sigma}$	Ρυθμός φθοράς για σφαιρικές επιφάνειες λαμβάνοντας υπόψη την πίεση στην τριβόμενη επιφάνεια
$\gamma'_{1-2}^{\delta}$	Ρυθμός φθοράς για δισκοειδείς επιφάνειες λαμβάνοντας υπόψη το ποσό της φθοράς και το σχήμα της φθαρμένης επιφάνειας
$\gamma'_{1-2}^k$	Ρυθμός φθοράς για κωνικές επιφάνειες λαμβάνοντας υπόψη το ποσό της φθοράς και το σχήμα της φθαρμένης επιφάνειας
$\gamma'_{1-2}^{\sigma}$	Ρυθμός φθοράς για σφαιρικές επιφάνειες λαμβάνοντας υπόψη το ποσό της φθοράς και το σχήμα της φθαρμένης επιφάνειας
VB	Πλάτος φθοράς ζώνης
KT	Πλάτος φθοράς κρατήρα
I	Ρυθμός φθοράς για ιμάντες
U	Φθορά στον αύλακα
$\gamma_m$	Προσδοκώμενη μέση τιμή της μεταβλητής $\gamma$
$\sigma_{\gamma}$	Τυπική απόκλιση της μεταβλητής $\gamma$



$U_{\max}$	Μέγιστη τιμή της γραμμικής φθοράς
$U_1, U_2$	Φθορά των μερών σε δεδομένο σημείο
$ h $	Επιτρεπτή φθορά για δόντι γραναζιού
$I_\gamma$	Γραμμικός ρυθμός φθοράς γραναζιού
$h_\gamma$	Φθορά γραναζιών
$t_y$	Βαθμός καμπύλης κόπωσης για ελαστική επαφή
$f_\tau$	Συντελεστής τριβής
$h_{\exp}$	Φθορά που λαμβάνεται πειραματικά

## ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ

$F_y$	Δύναμη ώσης (αξονική) στο εργαλείο
$u$	Ανοιγμένη ενέργεια κοπής
$t$	Χρόνος
$V$	Ταχύτητα κοπής
$\bar{\sigma}_{\max}$	Μέγιστη τάση οδόντος
$F_u$	Περιφερειακή δύναμη ιμαντοκίνησης
$P_n$	Ισχύς
$W$	Ισοδύναμο φορτίο
$\psi$	Παράγοντας έλξης για ιμάντες
$\sigma_{y,r}$	Αποδιδόμενη τάση
$F$	Ρυθμός πρόωσης
DOC	Βάθος κοπής
$M_r$	Ρυθμός αφαίρεσης υλικού
$S$	Πρόωση
$t$	Χρόνος
$\phi$	Σταθερά
$\Delta_{\mu}$	Σταθερά
$V_1$	Ταχύτητα κοπής
$V_2$	Ταχύτητα κοπής
$t^*$	Χρόνος αντικατάστασης εργαλείου
$P_n$	Ισχύς
$V_r$	Δεδομένη ταχύτητα κοπής

$t_l^*$	Χρόνος που απαιτείται για να φορτωθεί και να ξεφορτωθεί κάθε τεμάχιο και να επιστρέψει το εργαλείο στην αρχή της κοπής
$\sigma_m^R$	Παραμένουσα τάση στη μήτρα
$t_{ct}$	Χρόνος αλλαγής κάθε εργαλείου
$\tau_i$	Χρόνος που καταναλώνεται για την επιδιόρθωση του $i$ μέρους, συμπεριλαμβάνοντας αποσυναρμολόγηση, συναρμολόγηση και ρύθμιση
$T_i$	Χρόνος χρήσης του $i$ μέρους της μηχανής
$P_u$	Περιφερειακή δύναμη που μεταφέρεται από το δόντι
$b$	Πλάτος δοντιού
$m$	Μέτρο οδόντωσης
$P_{max}$	Μέγιστη πίεση στην επιφάνεια δοντιού
$n_i$	Ισχύς
$n_{\epsilon\delta}$	Συχνότητα περιστροφής εσωτερικού δακτυλίου
$J_o$	$J_o=5.67 \cdot 10^4 [F_r(1+s_j)/lzd_i s_j]^{1/2}$
$F_r$	Ακτινικό φορτίο
$k_u$	Παράγοντας περιστροφής
$k_{saf}$	Παράγοντας ασφαλείας
$m_o$	Σταθερά ( $1 < m_o < 3$ )
$c_o$	Συντελεστής συνθηκών λειτουργίας
$i$	Σχέση μετάδοσης
$y_1$	Σταθερά
$y_2$	Σταθερά
$x_1$	Σταθερά
$x_2$	Σταθερά
$y_c$	Συντελεστής κύλισης
$q_2$	Συντελεστής σχέσης μετάδοσης

$F_u$	Περιφερειακή δύναμη ιμαντοκίνησης
$n_\sigma$	Αριθμός στροφών μικρής τροχαλίας
$p$	Πίεση
$V$	Γραμμική ταχύτητα
$P_F$	Δύναμη στις εξισώσεις για συνδέσμους
$n_{\sigma\pi}$	Συχνότητα περιστροφής
$V_1, V_2$	Επιφανειακές ταχύτητες στην κατεύθυνση $x$
$P_o$	Μέγιστη πίεση επαφής σύμφωνα με τη θεωρία Hertz
$W$	Ισοδύναμο φορτίο
$y$	Αξονικός παράγοντας φορτίου
$F_u^*$	Αξονικό φορτίο
$C_j$	Δυναμικό φορτίο
$n_j$	Πλήθος περιστροφών
$P_{n\gamma}$	Φορτίο ανά μονάδα μήκους της γραμμής επαφής
$n_{2\gamma}$	Συχνότητα περιστροφής του (2)
$\eta_\gamma$	Συχνότητα περιστροφής
$v_{1,2}$	Επιφανειακή ταχύτητα
$v_{sp}$	Ταχύτητα γραναζιού
$P_i$	Περιφερειακή δύναμη
$M_{ti}$	Ροπή που μεταδίδεται από το γρανάζι
$\sigma_l$	Ένταση στον ιμάντα υπό την επίδραση φορτίου
$\sigma_o$	Ένταση στον ιμάντα λόγω προϋπάρχουσας τάσης
$P_\mu$	Πίεση στον αύλακα της τροχαλίας
$n_\mu$	Επαναλήψεις ανά λεπτό

## ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ

$P$	Παραγωγικότητα
$CPr$	Μέσο κόστος παραγωγής ανά τεμάχιο

$P(T)$	Πιθανότητα λειτουργίας χωρίς ελαττώματα για ένα μέρος
$L$	Ζωή σε εκατομμύρια περιστροφές
$t_2$	Ζωή ζεύγους γραναζιών
$K_d$	Συντελεστής χρήσης της εργαλειομηχανής
$\Omega$	Ζωή κοπτικού εργαλείου
$\Delta SA$	Δείκτης συμπίεσης αποβλήτου
$U$	Ανοιγμένη ενέργεια κοπής
$K_s$	Ειδική αντίσταση κοπής
$\Omega_r$	Διάρκεια ζωής κοπτικού εργαλείου για δεδομένη ταχύτητα κοπής $V_r$
$M$	Ολικό ανά μονάδα χρόνου κόστος εξοπλισμού και χειριστή
$C_t$	Κόστος κάθε εργαλείου
$K_d$	Συντελεστής χρήσης της Εργαλειομηχανής
$T^*$	Χρόνος ζωής
$L$	Ζωή σε εκατομμύρια περιστροφές εδράνου κύλισης εδράνου κύλισης
$L_h$	Ζωή σε ώρες
$t_2$	Χρόνος ζωής για πλήθος γραναζιών
$K\Sigma_{ir}$	Συνολικό κριτήριο απόδοσης

## ΡΕΟΛΟΓΙΚΕΣ

$\eta_\xi$	Ιξώδες
$P_\xi$	Πίεση
$h/R$	Πάχος φιλμ λιπαντικού προς ενεργό συντελεστή για κυλινδρικές επαφές
$h/R_x$	Πάχος φιλμ λιπαντικού προς ενεργό συντελεστή για ελλειπτικές επαφές
$\lambda_j$	Λόγος πάχους λιπαντικού και μέσης τραχύτητας επιφάνειας
$Q_\xi$	Σταθερά

$C_{\xi}$	Σταθερά
constant	Σταθερά
$n_o^*$	Βασικό ιξώδες
$a_{\xi}^*$	Δείκτης μεταβολής ιξώδους από την πίεση
$\rho_{\xi}(P)$	Πυκνότητα σε πίεση $P_{\xi}$
$\rho_j$	Σταθερά
$\eta_o$	Σταθερά ( $\eta_o = 0.22$ )
$q_4$	Συντελεστής λίπανσης
$\delta_{\xi}$	Συντελεστής θερμοκρασίας του ιξώδους
$\beta_{\xi}$	Σταθερά
$\gamma_{\xi}$	Σταθερά
$h_{\xi}$	Πάχος φιλμ λιπαντικού
$a_{pc}$	Piezo-coefficient
$n_{oj}$	Ιξώδες στην εξίσωση για κυλίνδρους

## ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ

KICc	Σύνθετη σκληρότητα
KICm	Σκληρότητα μήτρας
$u^*$	Τάση ενίσχυσης μέχρι τη θραύση
$\delta$	Απόσταση πλησιέστερου γειτονικού κόκκου
D	Μέγεθος κόκκου
f	Στοιχειώδης όγκος ή κλάσμα όγκου
$R_H$	Σύνθετη θερμική αντίσταση
$u_c$	Λόγος Poisson
$k_c$	Σύνθετη θερμική αγωγιμότητα
$E_c$	Συντελεστής Young
$a_c$	Συντελεστής θερμικής διαστολής
$k_m$	Θερμική αγωγιμότητα μήτρας
$\beta$	Λόγος Kapitza και μεγέθους κόκκου
$r_c$	Αριθμός Kapitza
$E_r$	Μέτρο Young ενίσχυσης
$E_m$	Μέτρο Young μήτρας

$Q$	Σταθερά
$s$	Σταθερά
$a_c$	Συντελεστής θερμικής διαστολής
$a_m$	Συντελεστής θερμικής διαστολής μήτρας
$a_r$	Συντελεστής θερμικής διαστολής ενίσχυσης
$u_m$	Λόγος Poisson μήτρας
$u_r$	Λόγος Poisson ενίσχυσης
$H_m$	Σκληρότητα ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και του μεγέθους κόκκου
$H_{o,m}$	Σκληρότητα δωματίου μήτρας συναρτήσει της θερμοκρασίας
$\eta^*$	Σταθερά
$d$	Μέγεθος κόκκου μήτρας
$a_l$	Σταθερά
$H_r$	Σκληρότητα ενίσχυσης συναρτήσει της θερμοκρασίας και του μεγέθους κόκκου
$H_{o,r}$	Σκληρότητα δωματίου ενίσχυσης συναρτήσει της θερμοκρασίας
$\Lambda$	Σταθερά
$a_2$	Σταθερά
$H_c$	Σύνθετη σκληρότητα
$H_m$	Σκληρότητα μήτρας
$\mu$	Συντελεστής τριβής
$\rho$	Σύνθετη πυκνότητα
$c$	Σύνθετη ειδική θερμότητα
$H(T)$	Σκληρότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας
$HV$	Σκληρότητα Vickers
$\lambda$	Θερμική αγωγιμότητα
$\alpha$	Συντελεστής θερμοδιαχυτότητας
$n$	Σταθερά
$j$	Σταθερά
$k^*$	Σταθερά



$h$	Ογκομετρική ειδική θερμότητα κατεργαζόμενου υλικού
$Q_k$	Συντελεστής οδόντωσης
$y_w$	Συντελεστής υλικού
$y_l$	Συντελεστής ποιότητας
$q_l^*$	Συντελεστής υπερθέρμανσης
$q_3$	Συντελεστής υλικών
$\alpha_o$	Προσδοκώμενη τιμή της μεταβλητής $\alpha$ , που είναι αρχική παράμετρος του προϊόντος
$k_{so}$	Σταθερά
$\xi$	Σταθερά
$\eta$	Σταθερά
$c_o$	Σταθερά
$\sigma_\alpha$	Τυπική απόκλιση της μεταβλητής $\alpha$
$k_l$	Σταθερά που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις συνθήκες όπως λίπανση
$k_2$	Σταθερά που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις συνθήκες όπως λίπανση
$G_l$	Μάζα στοιχείων που στηρίζονται από έδρανα
$\gamma_{gi}$	Πυκνότητα υλικού γκραναζιού
$C_v$	Σταθερά
$f^*$	Σταθερά
$g$	Σταθερά
$\gamma_{shi}$	Πυκνότητα υλικού άξονα
$E$	Λόγος ελαστικότητας
$k_{\mu}$	Συντελεστής συνθηκών τάσεων επαφής

## ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ

$r_t$	Ακτίνα ακμής εργαλείου
$r$	Ακτίνα καμπυλότητας της ακμής του

	εργαλείου
$\kappa$	Γωνία θέσεως της κύριας κόψης
A	Μέγεθος διατομής αποβλήτου
G	Συντελεστής μορφής της διατομής του Αποβλήτου
$t_1$	Θεωρητικό πάχος αποβλήτου
$t_2$	Πραγματικό πάχος αποβλήτου
$L_1$	Θεωρητικό μήκος αποβλήτου
$L_2$	Πραγματικό μήκος αποβλήτου
$d_{01}$	Διάμετρος διαίρεσης δοντιού
$\alpha\alpha$	Απόσταση αξόνων
$d_1$	Διάμετρος μικρής τροχαλίας
$\Delta$	Διάμετρος
$R_o$	Ακτίνα
$r_o$	Ακτίνα
$\alpha_o$	Γωνία μεταξύ των δύο επιφανειών
$\alpha_{01} , \alpha_{02}$	Συντεταγμένες του τόξου επαφής για σφαιρικές επιφάνειες
$R_{1x}, R_{2x}$	Ακτίνα καμπυλότητας των επιφανειών (άξονας x)
$\chi$	Λόγος $R_x$ και $R_y$
$R_{1y}, R_{2y}$	Ακτίνα καμπυλότητας των επιφανειών στην τομή yz
$s_j$	Σταθερά ( $s_j = d_r / d_1$ )
$d_r$	Διάμετρος κυλίνδρου
$d_1$	Διάμετρος αύλακα
$l$	Πραγματικό μήκος επαφής του κυλίνδρου με τον αύλακα
$z$	Αριθμός κυλίνδρων
$d_{gi}$	Ονομαστική διάμετρος γραναζιού
$d_{shi}$	Μέση διάμετρος άξονα
$l_{gi}$	Ενεργό μήκος γραναζιού
$l_{shi}$	Ενεργό μήκος άξονα
$n_{i\gamma}$	Αριθμός γραναζιών

$z_{\gamma}$	Αριθμός γειτονικών γραναζιών
$R_p$	Σχεδιαστική ακτίνα τροχαλίας
$k_l$	Γεωμετρικός συντελεστής
$R_{eff}$	Πραγματική ακτίνα καμπυλότητας πλευράς δοντιού
$R_{l\gamma}$	Ακτίνα σώματος 1
$R_{2\gamma}$	Ακτίνα σώματος 2
$z_2$	Αριθμός γειτονικών γραναζιών του (2)

## Πίνακας Συναρτήσεων

### ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

$$1. \quad KIC_c = KIC_m + \sqrt{KIC_m + \frac{8\pi u^* \sigma_{y,r}}{1 + \frac{\delta}{D}}} \quad \mathbf{M1/K1}$$

Όπου: $KIC_c$	Σύνθετη σκληρότητα
$KIC_m$	Σκληρότητα μήτρας
$u^*$	Τάση ενίσχυσης μέχρι τη θραύση
$\sigma_{y,r}$	Αποδιδόμενη τάση
$\delta$	Απόσταση πλησιέστερου γειτονικού κόκκου
$D$	Μέγεθος κόκκου

$$2. \quad R_H = \frac{KIC_c (1 - u_c) k_c}{E_c a_c} \quad \mathbf{M2/K2}$$

Όπου: $R_H$	Σύνθετη θερμική αντίσταση
$u_c$	Λόγος Poisson
$k_c$	Σύνθετη θερμική αγωγιμότητα
$E_c$	Μέτρο Young
$a_c$	Συντελεστής θερμικής διαστολής
$KIC_c$	Σύνθετη ανθεκτικότητα

$$3. \quad k_c = k_m \left[ \frac{1}{\frac{(1-f)^{3(1-\beta)}}{1+2\beta}} \right] \quad \mathbf{M3/K3}$$

Όπου: $k_c$	Σύνθετη θερμική αγωγιμότητα
$f$	Στοιχειώδης όγκος ή κλάσμα όγκου
$k_m$	Θερμική αγωγιμότητα μήτρας
$\beta$	Λόγος Kapitza και μεγέθους κόκκου

$$4. \quad \beta = \frac{r_c}{D}$$

**M4/K4**

Όπου: D	Μέγεθος κόκκου
$\beta$	Λόγος Karitza και μεγέθους κόκκου
$r_c$	Αριθμός Karitza

$$5. \quad E_c = \frac{1}{2} \left\{ [(1-f)E_m + fE_r] + \left[ \frac{E_m E_r}{fE_m + (1-f)E_r} \right] \left[ \frac{[1 - Q(T_f / T_m)^s]}{1 - QT_m^s} \right] \right\} \quad \mathbf{M5/K5}$$

Όπου: $E_c$	Συντελεστής Young
$E_r$	Συντελεστής Young ενίσχυσης
$E_m$	Συντελεστής Young μήτρας
f	Στοιχειώδης όγκος ή κλάσμα όγκου
Q	Σταθερά
$T_f$	Στιγμιαία θερμοκρασία εργαλείου κοπής
s	Σταθερά
$T_m$	Θερμοκρασία τήξης

$$6. \quad a_c = \frac{E_m a_m (1-f) + E_r a_r f}{E_m (1-f) + E_r f} \quad \mathbf{M6/K6}$$

Όπου: $a_c$	Συντελεστής θερμικής διαστολής
$a_m$	Συντελεστής θερμικής διαστολής μήτρας
$a_r$	Συντελεστής θερμικής διαστολής ενίσχυσης
f	Στοιχειώδης όγκος ή κλάσμα όγκου
$E_r$	Συντελεστής Young ενίσχυσης
$E_m$	Συντελεστής Young μήτρας

$$7. \quad \sigma_m^R = \frac{1}{2} (a_m - a_r) \Delta T \left( \frac{1 + 2u_m}{2E_m} + \frac{1 - 2u_r}{E_r} \right)^{-1} \quad \mathbf{M7/K7}$$

Όπου: $a_m$	Συντελεστής θερμικής διαστολής μήτρας
$a_r$	Συντελεστής θερμικής διαστολής ενίσχυσης
$\sigma_m^R$	Παραμένουσα τάση στη μήτρα
$\Delta T$	Κρίσιμη διαφορά θερμοκρασίας
$u_m$	Λόγος Poisson μήτρας

$u_r$	Λόγος Poisson ενίσχυσης
$E_r$	Συντελεστής Young ενίσχυσης
$E_m$	Συντελεστής Young μήτρας

$$8. \quad H_m = H_{0,m} + n^* d^{\frac{1}{2}} \exp^{-a_1 T_f} \quad \mathbf{M8/K8}$$

Όπου: $H_m$	Σκληρότητα ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και του μεγέθους κόκκου
$H_{0,m}$	Σκληρότητα δωματίου μήτρας συναρτήσει της θερμοκρασίας
$\eta^*$	Σταθερά
$d$	Μέγεθος κόκκου μήτρας
$a_1$	Σταθερά
$T_f$	Στιγμιαία θερμοκρασία εργαλείου κοπής

$$9. \quad H_r = H_{0,r} + \Lambda D^{\frac{1}{2}} \exp^{-a_2 T_f} \quad \mathbf{M9/K9}$$

Όπου: $H_r$	Σκληρότητα ενίσχυσης συναρτήσει της θερμοκρασίας και του μεγέθους κόκκου
$H_{0,r}$	Σκληρότητα δωματίου ενίσχυσης συναρτήσει της θερμοκρασίας
$\Lambda$	Σταθερά
$a_2$	Σταθερά
$T_f$	Στιγμιαία θερμοκρασία εργαλείου κοπής

$$10. \quad H_c = fH_r + (1-f)H_m \quad \mathbf{M10/K10}$$

Όπου: $H_r$	Σκληρότητα ενίσχυσης συναρτήσει της θερμοκρασίας και του μεγέθους κόκκου
$H_c$	Σύνθετη σκληρότητα
$H_m$	Σκληρότητα μήτρας
$f$	Στοιχειώδης όγκος ή κλάσμα όγκου



## ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΑΠΟ ΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

$$11. T_f = T_o + 0.3 \mu V^{\frac{1}{2}} F_y^{0.25} (\pi H_c)^{\frac{3}{4}} (k_c \rho c)^{-\frac{1}{2}}$$

**A1/K11**

Όπου: $T_o$	Μέση θερμοκρασία εργαλείου κοπής
$\mu$	Συντελεστής τριβής
$V$	Ταχύτητα κοπής
$F_y$	Δύναμη ώσης (αξονική) στο εργαλείο
$\rho$	Σύνθετη πυκνότητα
$c$	Σύνθετη ειδική θερμότητα
$H_c$	Σύνθετη σκληρότητα
$k_c$	Σύνθετη θερμική αγωγιμότητα
$T_f$	Στιγμιαία θερμοκρασία εργαλείου κοπής

$$12. F_y = 1023.24 V^{-0.183} F^{0.393} DOC^{0.465}$$

**A2/K12**

Όπου: $V$	Ταχύτητα κοπής
$F_y$	Δύναμη ώσης (αξονική) στο εργαλείο
$F$	Ρυθμός πρόωσης
$DOC$	Βάθος κοπής

$$13. t_m = \frac{\pi \lambda^2 (T_m - \theta_o)^2}{4 a \cdot q_1}$$

**A3/K13**

Όπου: $t_m$	Χρόνος για την αρχή τήξης του υλικού κάτω από σταθερή ροή θερμότητας
$\lambda$	Θερμική αγωγιμότητα
$q_1$	Ροή θερμότητας
$t_m$	Θερμοκρασία τήξης
$\theta_o$	Αρχική θερμοκρασία
$a$	Συντελεστής θερμοδιαχυτότητας

## ΕΙΣΩΣΕΙΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

$$14. R_a = \frac{F^2}{18\sqrt{3}r_t}$$

**A4/K14**

Όπου: F

Ρυθμός πρόωσης

$R_a$

Τραχύτητα επιφάνειας

$r_t$

Ακτίνα ακμής εργαλείου

$$15. \Omega = \Gamma T_f^{-b}$$

**A5/K15**

Όπου:  $\Omega$

Ζωή κοπτικού εργαλείου

$T_f$

Στιγμιαία θερμοκρασία κοπτικού εργαλείου

$\Gamma$

Σταθερά

b

Σταθερά

$$16. M_R = 12FDOCV$$

**K16**

Όπου:  $M_R$

Ρυθμός αφαίρεσης υλικού

F

Ρυθμός τροφοδοσίας

DOC

Βάθος κοπής

V

Ταχύτητα κοπής

$$17. h_e = \frac{DOCS}{\frac{DOC - r(1 - \sin \kappa)}{\eta \mu \kappa} + \frac{\pi \kappa r}{180^\circ} + r \tan \left( \frac{S}{2r} \right)}$$

**A6/K17**

Όπου: DOC

Βάθος κοπής εργαλείου

$\kappa$

Γωνία θέσεως της κύριας κόψης

$h_e$

Ισοδύναμο πάχος αποβλήτου

S

Πρόωση

r

Ακτίνα καμπυλότητας της ακμής του εργαλείου

$$18. VB = Y_1 t^{x_1 V_1}$$

**A7/K18**

Όπου: VB

$y_1$

$x_1$

t

$V_1$

Πλάτος φθοράς ζώνης

Σταθερά

Σταθερά

Χρόνος κοπής

Ταχύτητα κοπής

$$19. KT = Y_2 t^{x_2 V_2}$$

**A8/K19**

Όπου: KT

$y_2$

$V_2$

$x_2$

t

Πλάτος φθοράς κρατήρα

Σταθερά

Ταχύτητα κοπής

Σταθερά

Χρόνος κοπής

$$20. P = \frac{h_s V \Omega}{\Omega - t^*}$$

**A9/K20**

Όπου: P

$h_s$

$\Omega$

$t^*$

V

Παραγωγικότητα

Ισοδύναμο πάχος αποβλήτου

Ζωή κοπτικού εργαλείου

Χρόνος αντικατάστασης εργαλείου

Ταχύτητα κοπής

$$21. V = \frac{C_v \left( \frac{G}{5} \right)^g}{A^{f^*} \left( \frac{\Omega}{60} \right)^n}$$

**M11/K21**

Όπου: V

$C_v$

A

G

$f^*$

$\Omega$

Ταχύτητα κοπής

Σταθερά

Μέγεθος διατομής αποβλήτου

Συντελεστής μορφής της διατομής του αποβλήτου

Σταθερά

Ζωή κοπτικού εργαλείου

$$22. \Delta \Sigma A = \frac{t_2}{t_1} = \frac{L_1}{L_2}$$

**A10/K22**

Όπου:  $\Delta \Sigma A$

$t_1$

Δείκτης συμπίεσης αποβλήτου

Θεωρητικό πάχος αποβλήτου

$t_2$

Πραγματικό πάχος αποβλήτου

$L_1$

Θεωρητικό μήκος αποβλήτου

$L_2$

Πραγματικό μήκος αποβλήτου

$$23. u = \frac{F_y}{A}$$

**A11/K23**

Όπου:  $F_y$

Κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής

$u$

Ανηγμένη ενέργεια κοπής

$A$

Μέγεθος διατομής αποβλήτου

$$24. CP_r = Mt_1^* + Mk^*V^{-1} + \frac{k^*}{V_r^{1/\eta}\Omega_r} (Mt_{ct} + C_t)V^{(1-\eta)/\eta}$$

**A12/K24**

Όπου:  $CP_r$

Μέσο κόστος παραγωγής ανά τεμάχιο

$M$

Ολικό κόστος ανά μονάδα χρόνου

εξοπλισμού και χειριστή

$t_1^*$

Χρόνος που απαιτείται για να φορτωθεί  
και να εκφορτωθεί κάθε τεμάχιο και να  
επιστρέψει το εργαλείο στην αρχή της  
κοπής

$k^*$

Σταθερά

$C_t$

Κόστος κάθε εργαλείου

$t_{ct}$

Χρόνος αλλαγής κάθε εργαλείου

$\eta$

Σταθερά

$V$

Ταχύτητα κοπής

$\Omega_r$

Διάρκεια ζωής κοπτικού εργαλείου για  
δεδομένη ταχύτητα κοπής  $V_r$

$$25. T_F = \frac{C_e k_s V^{n_0} A^{n_0}}{\lambda_\theta^{2n_0} h^{1-2n_0}}$$

**A13/K25**

Όπου:  $T_F$

Μέση θερμοκρασία της επιφάνειας

επαφής αποβλήτου-εργαλείου

$h$

Ογκομετρική ειδική θερμότητα

κατεργαζόμενου υλικού

$c_o$

Σταθερά

$\eta_o$

Σταθερά ( $\eta_o = 0.22$ )

$k_s$

Ειδική αντίσταση κοπής

$A$

Μέγεθος διατομής αποβλήτου

$V$

Ταχύτητα κοπής

$\lambda_\theta$

Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας  
κατεργαζόμενου υλικού

$$26. K_d = \frac{1}{1 + \sum \frac{\tau_i}{T_i}}$$

**A14/E1**

Όπου:  $K_d$

Συντελεστής χρήσης της

Εργαλειομηχανής

$\tau_i$

Χρόνος που καταναλώνεται για την  
επιδιόρθωση του i-οστού μέρους,  
συμπεριλαμβάνοντας  
αποσυναρμολόγηση, συναρμολόγηση  
και ρύθμιση

$T_i$

Χρόνος χρήσης του i-οστού μέρους της  
μηχανής

### **ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥΣ ΤΡΟΧΟΥΣ**

$$27. \sigma_{\max} = \frac{P_u}{bm} Q_k$$

**M12/E2**

Όπου:  $\sigma_{\max}$

Μέγιστη τάση οδόντος

$P_u$	Περιφερειακή δύναμη που μεταφέρεται από το δόντι
$b$	Πλάτος δοντιού
$m$	Μέτρο οδόντωσης
$Q_k$	Συντελεστής οδόντωσης

Πρέπει  $\sigma_{\max} \leq \sigma_b$  επιτρεπόμενης καμπτικής τάσης

$$28. P_{\max} = \sqrt{\frac{P_u}{bd_{01}} \frac{i+1}{i}} y_w y_c y_l \quad \mathbf{M13/E3}$$

Όπου: $P_{\max}$	Μέγιστη πίεση στην επιφάνεια δοντιού
$P_u$	Περιφερειακή δύναμη
$d_{01}$	Διάμετρος διαίρεσης δοντιού
$b$	Πλάτος δοντιού
$i$	Σχέση μετάδοσης
$y_w$	Συντελεστής υλικού
$y_c$	Συντελεστής κύλισης
$y_l$	Συντελεστής ποιότητας

Πρέπει  $P_{\max} < P_{\text{επιτρεπόμενης}}$

$$29. S_T = \left( \frac{aa}{100} \right)^2 \frac{q_1^* q_2 q_3 q_4}{n_1} \quad \mathbf{A15/E4}$$

Όπου: $S_T$	Λόγος απαγόμενης θερμότητας προς τη δημιουργούμενη θερμότητα λόγω τριβής στο μειωτή στροφών
$aa$	Απόσταση αξόνων
$n_1$	Ισχύς
$q_1^*$	Συντελεστής υπερθέρμανσης
$q_2$	Συντελεστής σχέσης μετάδοσης
$q_3$	Συντελεστής υλικών
$q_4$	Συντελεστής λίπανσης

Ο τύπος ισχύει για σύστημα ατέρμονα κοχλία και κορόνας

$$30. t_2 = \frac{|h|_2}{2.25 I_2 [P_n R_{eff} (\Theta_1 + \Theta_2)]^{1/2} \left( i_{1,2} \frac{R_{1\gamma}}{R_{2\gamma}} \cdot 1 \right) n_2 z_2}$$

**A33/E5**

Όπου: $t_2$	Χρόνος ζωής ζεύγους γραναζιών
$ h $	Επιτρεπτή φθορά για δόντι γραναζιού
$I_\gamma$	Γραμμικός ρυθμός φθοράς γραναζιού
$P_{n\gamma}$	Φορτίο ανά μονάδα μήκους της γραμμής επαφής
$R_{eff}$	Πραγματική ακτίνα καμπυλότητας πλευράς δοντιού
$\Theta_1$	Θερμοκρασία σώματος 1
$\Theta_2$	Θερμοκρασία σώματος 2
$R_{1\gamma}$	Ακτίνα σώματος 1
$R_{2\gamma}$	Ακτίνα σώματος 2
$n_{2\gamma}$	Συχνότητα περιστροφής του (2)
$z_2$	Αριθμός γειτονικών γραναζιών του (2)

$$31. h_\gamma = 2.25 I_\gamma \sqrt{P_n (\Theta_1 + \Theta_2) R_{eff} n_\gamma z_\gamma t}$$

**A34/E6**

Όπου: $h_\gamma$	Φθορά γραναζιών
$\eta_\gamma$	Συχνότητα περιστροφής
$z_\gamma$	Αριθμός γειτονικών γραναζιών
$I_\gamma$	Γραμμικός ρυθμός φθοράς γραναζιού
$P_{n\gamma}$	Φορτίο ανά μονάδα μήκους της γραμμής επαφής
$\Theta_1$	Θερμοκρασία σώματος 1
$\Theta_2$	Θερμοκρασία σώματος 2
$R_{eff}$	Πραγματική ακτίνα καμπυλότητας πλευράς δοντιού
$t$	Χρόνος

*Ο τύπος ισχύει για μηχανισμούς που λειτουργούν ελλείψει λιπαντικού*



$$32. I_{\gamma} = \frac{h_{\exp} V_{i,2}}{2.25 \sqrt{P_n (\Theta_1 + \Theta_2)} R_{\text{eff}} V_{sp} n_{\gamma} z_{\gamma} t}$$

**A35/E7**

Όπου: $I_{\gamma}$	Γραμμικός ρυθμός φθοράς γραναζιού
$h_{\exp}$	Φθορά που λαμβάνεται πειραματικά
$v_{1,2}$	Επιφανειακή ταχύτητα
$v_{sp}$	Ταχύτητα γραναζιού
$\eta_{\gamma}$	Συχνότητα περιστροφής
$z_{\gamma}$	Αριθμός γειτονικών γραναζιών
$P_{n\gamma}$	Φορτίο ανά μονάδα μήκους της γραμμής επαφής
$R_{\text{eff}}$	Πραγματική ακτίνα καμπυλότητας πλευράς δοντιού
$\Theta_1$	Θερμοκρασία σώματος 1
$\Theta_2$	Θερμοκρασία σώματος 2
$t$	Χρόνος

*Ο τύπος ισχύει για μηχανισμούς που λειτουργούν ελλείψει λιπαντικού*

$$33. K_{iri} = \frac{\pi \gamma_{gi} d_{gi}^3 \left( l_{gi} + l_{shi} \frac{\gamma_{shi}}{\gamma_{gi}} \frac{d_{shi}^2}{d_{gi}^2} \right)}{8 M_{ii}}$$

**A36/E8**

Όπου: $K_{iri}$	$K_{iri} = G_i / P_i$
$G_i$	Μάζα στοιχείων που στηρίζονται από έδρανα
$P_i$	Περιφερειακή δύναμη
$\gamma_{gi}$	Πυκνότητα υλικού γραναζιού
$\gamma_{shi}$	Πυκνότητα υλικού άξονα
$d_{gi}$	Ονομαστική διάμετρος γραναζιού
$d_{shi}$	Μέση διάμετρος άξονα
$M_{ti}$	Ροπή που μεταδίδεται από το γρανάζι
$l_{gi}$	Ενεργό μήκος γραναζιού
$l_{shi}$	Ενεργό μήκος άξονα

$$34. K\Sigma_{ir} = \sum_{i=1}^{n_{iy}} K_{iri}$$

**A37/E9**

Όπου:  $K_{\Sigma ir}$

Συνολικό κριτήριο απόδοσης

$n_{iy}$

Αριθμός γραναζιών

### **ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΜΑΝΤΟΚΙΝΗΣΗ**

$$35. F_u = \left( \frac{1.432 \cdot 10^6}{d_1 n_\sigma} \right) P_n c_o$$

**M14/E10**

Όπου:  $F_u$

Περιφερειακή δύναμη ιμαντοκίνησης

$d_1$

Διάμετρος μικρής τροχαλίας

$n_\sigma$

Αριθμός στροφών μικρής τροχαλίας

$c_o$

Συντελεστής συνθηκών λειτουργίας

$P_n$

Ονομαστική ισχύς

$$36. \psi = \frac{\sigma_l}{2\sigma_o}$$

**M25/E11**

Όπου:  $\psi$

Παράγοντας έλξης

$\sigma_l$

Ένταση στον ιμάντα υπό την επίδραση φορτίου

$\sigma_o$

Ένταση στον ιμάντα λόγω προϋπάρχουσας τάσης

$$37. I = k_1 \phi \rho^{(t_v/5)+1} E^{(4t_v/5)-1} \Delta^{2t_v/5} \left( \frac{k_{i\mu} f_1}{\sigma_o} \right)^{t_v}$$

**A38/E12**

Όπου:  $I$

Ρυθμός φθοράς για ιμάντες

$k_1$

Γεωμετρικός συντελεστής

$k_{i\mu}$

Συντελεστής συνθηκών τάσεων επαφής

$\phi$

Σταθερά

$E$

Λόγος ελαστικότητας

$\Delta_{i\mu}$

Σταθερά

$P_{i\mu}$

Πίεση στον αύλακα της τροχαλίας

$t_y$	Βαθμός καμπύλης τριβής κόπωσης για ελαστική επαφή
$\sigma_o$	Ένταση στον ιμάντα λόγω προϋπάρχουσας τάσης
$f_l$	εφελκυστική δύναμη

$$38. U = I \frac{2\pi}{f_\tau} R_p \psi \left( 1 + \frac{\psi^2}{3} \right) n_{\mu} t$$

**A39/E13**

Όπου: $f_\tau$	Συντελεστής τριβής
$R_p$	Σχεδιαστική ακτίνα τροχαλίας
$n_{\mu}$	Επαναλήψεις ανά λεπτό
$\psi$	Παράγοντας έλξης
$I$	Ρυθμός φθοράς για ιμάντες
$U$	Φθορά στον αύλακα
$t$	Χρόνος

### **ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ**

$$39. S = \frac{V \cdot 1000}{\pi \Delta}$$

**M15/K26**

Όπου: $V$	Ταχύτητα κοπής
$\Delta$	Διάμετρος
$S$	Πρόωση

$$40. F_y = k_{so} \cdot DOC \cdot S$$

**M16/K27**

Όπου: $F_y$	Εφαπτομενική δύναμη κοπής
$k_{so}$	Σταθερά
$DOC$	Βάθος κοπής
$S$	Πρόωση

$$41. P_n = \frac{V \cdot DOC \cdot S \cdot k_{so}}{60 \cdot 1000}$$

**A16/K28**

Όπου:  $P_n$

$V$

$k_{so}$

$DOC$

$S$

Ισχύς

Ταχύτητα κοπής

Σταθερά

Βάθος κοπής

Πρώωση

$$42. t_c = \frac{L}{S} i$$

**K29**

Όπου:  $t_c$

$L$

$S$

$i$

Χρόνος κοπής

Μήκος κατά το οποίο μετατοπίζεται συνολικά το εργαλείο

Πρώωση

Αριθμός των περασμάτων που είναι απαραίτητα για την εκτέλεση της συγκεκριμένης κατεργασίας

### **ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΦΘΟΡΑΣ**

$$43. \gamma = k p^{m_0} v^\xi$$

**A17/E14**

Όπου:  $\gamma$

$p$

$V$

$m_0$

$\xi$

Ρυθμός φθοράς σε μηχανικά μέρη

Πίεση

Γραμμική ταχύτητα

Σταθερά ( $1 < m_0 < 3$ )

Σταθερά

$$44. f_o(\gamma) = \frac{1}{\sigma_k \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\gamma - \gamma_m)^2}{2\sigma_\gamma^2} \right]$$

**A18/E15**

Όπου:  $\gamma$

$f_o(\gamma)$

Ρυθμός φθοράς σε μηχανικά μέρη

Συνάρτηση πυκνότητας- πιθανότητας

φθοράς

$\gamma_m$	Προσδοκώμενη μέση τιμή της μεταβλητής $\gamma$
$\sigma_\gamma$	Τυπική απόκλιση της μεταβλητής $\gamma$

$$45. P(T) = 0.5 + \Phi \left( \frac{U_{\max} - a_o - \gamma_m T^*}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_\gamma^2 T^{*2}}} \right) \quad \mathbf{A19/E16}$$

Όπου: $P(T)$	Πιθανότητα λειτουργίας χωρίς ελαττώματα για ένα μέρος
$\alpha_o$	Προσδοκώμενη τιμή της μεταβλητής $\alpha$ , που είναι αρχική παράμετρος του προϊόντος
$T^*$	Χρόνος ζωής
$\sigma_\alpha$	Τυπική απόκλιση της μεταβλητής $\alpha$
$\sigma_\gamma$	Τυπική απόκλιση της μεταβλητής $\gamma$
$U_{\max}$	Μέγιστη τιμή της γραμμικής φθοράς
$\gamma_m$	Προσδοκώμενη μέση τιμή της μεταβλητής $\gamma$
$\Phi$	Κανονικοποιημένη συνάρτηση Laplace

Συνολικά για την εργαλειομηχανή ισχύει:  $P(T) = \prod_1^n P_i(T)$

**ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΠΑΦΕΣ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ**  
**ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΤΗΝ ΠΙΕΣΗ ΣΤΗΝ ΤΡΙΒΟΥΣΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ.**

$$46. \text{ Δισκοειδείς επιφάνειες : } \gamma_{1-2} = \frac{(k_1 + k_2) P_F n_{\sigma\pi}}{R_o - r_e} \quad \mathbf{A20/E17}$$

Όπου: $\gamma_{1-2}^\delta$	Ρυθμός φθοράς για δισκοειδείς επιφάνειες λαμβάνοντας υπόψη την πίεση στην τρίβουσα επιφάνεια
$P_F$	Δύναμη στις εξισώσεις για συνδέσμους
$n_{\sigma\pi}$	Συχνότητα περιστροφής
$R_o$	Ακτίνα

$r_o$

Ακτίνα

$k_1, k_2$

Σταθερές που χαρακτηρίζουν την  
αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις  
συνθήκες όπως λίπανση

47. Κωνικές επιφάνειες :

$$\gamma_{1-2} = \frac{P_F (k_1 + k_2) n_{\sigma\pi}}{(R_o - r_o) \cos a_o} \quad \mathbf{A21/E18}$$

Όπου:  $\gamma_{1-2}^k$

Ρυθμός φθοράς για κωνικές  
επιφάνειες λαμβάνοντας υπόψη την  
πίεση στην τριβουσα επιφάνεια

$k_1$

Σταθερά που χαρακτηρίζει την  
αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις  
συνθήκες όπως λίπανση

$k_2$

Σταθερά που χαρακτηρίζει την  
αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις  
συνθήκες όπως λίπανση

$P_F$

Δύναμη στις εξισώσεις για συνδέσμους

$n_{\sigma\pi}$

Συχνότητα περιστροφής

$R_o$

Ακτίνα

$r_o$

Ακτίνα

48. Σφαιρικές επιφάνειες :

$$\gamma_{1-2} = \frac{4P_F n_{\sigma\pi} (k_1 + k_2)}{R_o (\sin 2a_{o2} + 2a_{o2} - \sin 2a_{o1} - 2a_{o1})}$$

**A22/E19**

Όπου:  $\gamma_{1-2}^\sigma$

Ρυθμός φθοράς για σφαιρικές  
επιφάνειες λαμβάνοντας υπόψη την  
πίεση στην τριβουσα επιφάνεια

$k_1$

Σταθερά που χαρακτηρίζει την  
αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις  
συνθήκες όπως λίπανση

$k_2$

Σταθερά που χαρακτηρίζει την  
αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις

$P_F$	συνθήκες όπως λίπανση
$n_{σπ}$	Δύναμη στις εξισώσεις για συνδέσμους
$R_o$	Συχνότητα περιστροφής
$r_o$	Ακτίνα
	Ακτίνα

49. Δισκοειδείς επιφάνειες :

$$U_1 = k_1 \frac{P_F n_{σπ}}{R_o - r_o} t_o \quad \text{και} \quad U_2 = k_2 \frac{P_F n_{σπ}}{R_o - r_o} t_o$$

### A28/E20

Όπου: $U_1, U_2$	Φθορά των μερών σε δεδομένο σημείο
$k_1$	Σταθερά που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις συνθήκες όπως λίπανση
$k_2$	Σταθερά που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις συνθήκες όπως λίπανση
$P_F$	Δύναμη στις εξισώσεις για συνδέσμους
$n_{σπ}$	Συχνότητα περιστροφής
$R_o$	Ακτίνα
$r_o$	Ακτίνα
$t$	Χρόνος

50. Κωνικές επιφάνειες :

$$U_1 = k_1 \frac{P_F n_{σπ}}{R_o - r_o} t_o \quad \text{και} \quad U_2 = k_2 \frac{P_F n_{σπ}}{R_o - r_o} t_o$$

### A27/E21

Όπου: $U_1, U_2$	Φθορά των μερών σε δεδομένο σημείο
$k_1$	Σταθερά που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις συνθήκες όπως λίπανση
$k_2$	Σταθερά που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις συνθήκες όπως λίπανση
$P_F$	Δύναμη στις εξισώσεις για συνδέσμους
$n_{σπ}$	Συχνότητα περιστροφής



$R_o$	Ακτίνα
$r_o$	Ακτίνα
$t$	Χρόνος

51. Σφαιρικές επιφάνειες :

$$U_1 = \gamma_{1-2} \frac{k_1 \cos a_o}{k_1 + k_2} t_o \text{ και } U_2 = \gamma_{1-2} \frac{k_2 \cos a_o}{k_1 + k_2} t_o$$

### **A26/E22**

Όπου: $U_1, U_2$	Φθορά των μερών σε δεδομένο σημείο
$k_1$	Σταθερά που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις συνθήκες όπως λίπανση
$k_2$	Σταθερά που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις συνθήκες όπως λίπανση
$P_F$	Δύναμη στις εξισώσεις για συνδέσμους
$n_{\sigma\pi}$	Συχνότητα περιστροφής
$R_o$	Ακτίνα
$r_o$	Ακτίνα
$t$	Χρόνος
$a_o$	Γωνία μεταξύ της κανονικής και της τριβουσας επιφάνειας

### **ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΠΑΦΕΣ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΤΟ ΠΟΣΟ ΤΗΣ ΦΘΟΡΑΣ ΚΑΙ ΤΟ ΣΧΗΜΑ ΤΗΣ ΦΘΑΡΜΕΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.**

52. Δισκοειδείς επιφάνειες :

$$\gamma_{1-2} = (k_1 + k_2) \frac{\left(2 - \frac{1}{m_o}\right)^{m_o} P_F^{m_o} n_{\sigma\pi}}{\left(R_o^{2-1/m_o} - r_o^{2-1/m_o}\right)^{m_o} (2\pi)^{m_o-1}}$$

### **A23/E23**

Όπου: $\gamma'_{1-2}{}^\delta$	Ρυθμός φθοράς για δισκοειδείς
--------------------------------	-------------------------------

$P_F$	Επιφάνειες λαμβάνοντας υπόψη το ποσό της φθοράς και το σχήμα της φθαρμένης επιφάνειας
$n_{\sigma\pi}$	Δύναμη στις εξισώσεις για συνδέσμους
$R_o$	Συχνότητα περιστροφής
$r_o$	Ακτίνα
$k_1$	Ακτίνα
	Σταθερά που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις συνθήκες όπως λίπανση
$k_2$	Σταθερά που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις συνθήκες όπως λίπανση
$m_o$	Σταθερά ( $1 < m_o < 3$ )

53. Κωνικές επιφάνειες :

$$\gamma_{1-2} = \frac{(k_1 + k_2)}{\cos a_{\omega}} \left[ \frac{\left(2 - \frac{1}{m_o}\right) P_F}{2\pi \left(R_o^{2-1/m_o} - r_o^{2-1/m_o}\right)} \right]^{m_o} 2\pi n_{\sigma\pi}$$

## A24/E24

Όπου:  $\gamma'_{1-2}^k$

$P_F$	Ρυθμός φθοράς για κωνικές επιφάνειες λαμβάνοντας υπόψη το ποσό της φθοράς και το σχήμα της φθαρμένης επιφάνειας
$n_{\sigma\pi}$	Δύναμη στις εξισώσεις για συνδέσμους
$R_o$	Συχνότητα περιστροφής
$r_o$	Ακτίνα
$k_1$	Ακτίνα
	Σταθερά που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις συνθήκες όπως λίπανση
$k_2$	Σταθερά που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις συνθήκες όπως λίπανση

$m_o$

Σταθερά ( $1 < m_o < 3$ )

$a_o$

Γωνία μεταξύ της κανονικής και της τριβουσας επιφάνειας

54. Σφαιρικές επιφάνειες :

$$\gamma_{1-2} = \frac{P_F^{m_o} (k_1 + k_2) n_{\sigma\pi}}{(2\pi)^{m_o-1} R_o^{2m_o+2} \left[ \int_{a_{o1}}^{a_{o2}} (\cos a_o)^{1+1/m_o} da_o \right]^{m_o}}$$

### A25/E25

Όπου:  $\gamma'_{1-2}{}^\sigma$

Ρυθμός φθοράς για σφαιρικές επιφάνειες λαμβάνοντας υπόψη το ποσό της φθοράς και το σχήμα της φθαρμένης επιφάνειας

$P_F$

Δύναμη στις εξισώσεις για συνδέσμους

$n_{\sigma\pi}$

Συχνότητα περιστροφής

$R_o$

Ακτίνα

$r_o$

Ακτίνα

$k_1$

Σταθερά που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις συνθήκες όπως λίπανση

$k_2$

Σταθερά που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις συνθήκες όπως λίπανση

$m_o$

Σταθερά ( $1 < m_o < 3$ )

$a_{o1}, a_{o2}$

Συντεταγμένες του τόξου επαφής για σφαιρικές επιφάνειες

55. Δισκοειδείς επιφάνειες :

$$U_1 = \gamma_{1-2} \frac{k_1}{k_1 + k_2} t_o \text{ και } U_2 = \gamma_{1-2} \frac{k_2}{k_1 + k_2} t_o$$

### A29/E26

Όπου:  $t$

Χρόνος

$U_1, U_2$

Φθορά των μερών σε δεδομένο σημείο

$k_1$

Σταθερά που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις

$k_2$	συνθήκες όπως λίπανση Σταθερά που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις συνθήκες όπως λίπανση
$\gamma_{1-2}$	Ρυθμός φθοράς
56. Κωνικές επιφάνειες :	$U_1 = \gamma_{1-2} \frac{k_1 \cos a_o}{k_1 + k_2} t_o \text{ και } U_2 = \gamma_{1-2} \frac{k_2 \cos a_o}{k_1 + k_2} t_o$
<b>A30/E27</b>	
Όπου: t	Χρόνος
$U_1, U_2$	Φθορά των μερών σε δεδομένο σημείο
$k_1$	Σταθερά που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις συνθήκες όπως λίπανση
$k_2$	Σταθερά που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις συνθήκες όπως λίπανση
$\gamma_{1-2}$	Ρυθμός φθοράς
$a_o$	Γωνία μεταξύ της κανονικής και της τρίβουσας επιφάνειας

57. Σφαιρικές επιφάνειες :

$$U_1 = \gamma_{1-2} \frac{k_1 \cos a_o}{k_1 + k_2} t_o \text{ και } U_2 = \gamma_{1-2} \frac{k_2 \cos a_o}{k_1 + k_2} t_o$$

**A31/E28**

Όπου: t	Χρόνος
$U_1, U_2$	Φθορά των μερών σε δεδομένο σημείο
$k_1$	Σταθερά που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις συνθήκες όπως λίπανση
$k_2$	Σταθερά που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε φθορά του υλικού και τις συνθήκες όπως λίπανση
$\gamma_{1-2}$	Ρυθμός φθοράς

$a_o$

Γωνία μεταξύ της κανονικής και της  
τρίβουσας επιφάνειας

### ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΛΙΠΑΝΤΙΚΟ

$$58. \log \log(n_{\xi} / p_{\xi} + Q_{\xi}) = \text{const} - c_{\xi} \log \theta$$

**M17/E29**

Όπου: $\eta_{\xi}$	Ιξώδες
$P_{\xi}$	Πίεση
$Q_{\xi}$	Σταθερά
$C_{\xi}$	Σταθερά

$$59. n_{\xi} = n_o^* \exp a_{\xi}^* p_{\xi}$$

**M18/E30**

Όπου: $\eta_{\xi}$	Ιξώδες
$P_{\xi}$	Πίεση
$n_o^*$	Βασικό ιξώδες
$a_{\xi}^*$	Δείκτης μεταβολής ιξώδους από την πίεση

$$60. \left( \frac{\rho_{\xi}(p)}{\rho_{\xi o}} \right) = \frac{1 + 2.27 p_{\xi}}{1 + 1.68 p_{\xi}}$$

**M19/E31**

Όπου: $\rho_{\xi}(P)$	Πυκνότητα σε πίεση $P_{\xi}$
$P_{\xi}$	Πίεση

$$61. n_{\xi} = n_o^* \exp \left[ \frac{a_{\xi} p_{\xi}}{1 + \beta_{\xi} p_{\xi}} - \delta^* (\theta_{\xi} - \theta_{0\xi}) \right]$$

**M20/E32**

Όπου: $\eta_{\xi}$	Ιξώδες
$P_{\xi}$	Πίεση
$n_o^*$	Βασικό ιξώδες
$a_{\xi}^*$	Δείκτης μεταβολής ιξώδους από την πίεση
$\theta_{\xi}$	Θερμοκρασία

$\delta_{\xi}$	Συντελεστής θερμοκρασίας του ιξώδους
$\beta_{\xi}$	Σταθερά
$\gamma_{\xi}$	Σταθερά

$$62. \frac{h}{R} = 1.65 \left( \frac{n_{\xi} a v}{R} \right)^{0.73} \left( \frac{P_o}{E'} \right)^{-0.18}$$

**M21/E33**

Όπου: $\eta_{\xi}$	Ιξώδες
a	Piezo-coefficient of the base oil contained in the lubricant
h	Πάχος φιλμ λιπαντικού
$P_o$	Μέγιστη πίεση επαφής σύμφωνα με τη θεωρία Hertz
$v = \frac{v_1 + v_2}{2}$	
$v_1, v_2$	Ταχύτητες των επιφανειών των κυλίνδρων σχετικά με τους άξονές τους
$E' = \frac{E}{(1 - \mu)^2}$	
$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 \pm R_2}$	Ενεργός συντελεστής
$R_1, R_2$	Ακτίνες των κυλίνδρων

Ο παραπάνω τύπος ισχύει για επαφή δύο κυλίνδρων

$$63. \frac{h}{R_x} = (1.82 - 0.68\chi) \left( \frac{n_{\xi} a v}{R_x} \right)^{0.75} \left( \frac{P_o}{E'} \right)^{-0.25}$$

**M22/E34**

Όπου: $h_{\xi}$	Πάχος φιλμ λιπαντικού
$R_x = R_{1x} R_{2x} (R_{1x} \pm R_{2x})$	
$R_{1x}, R_{2x}$	Ακτίνα καμπυλότητας των επιφανειών (άξονας x)
$\chi$	Λόγος $R_x$ και $R_y$
$R_y = R_{1y} R_{2y} (R_{1y} \pm R_{2y})$	
$R_{1y}, R_{2y}$	Ακτίνα καμπυλότητας των επιφανειών στην τομή yz

$\alpha_{pc}$ 

Piezo-coefficient

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

 $v_1, v_2$ 

Ταχύτητες των επιφανειών των  
κυλίνδρων σχετικά με τους άξονές τους

$$E' = \frac{E}{(1 - \mu)^2}$$

Ο παραπάνω τύπος ισχύει για ελλειπτικές επαφές

### ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΑ ΕΔΡΑΝΑ ΚΥΛΙΣΗΣ

$$64. \lambda_j = \frac{11.3s_j}{1+s_j} \frac{d_1}{\sqrt{R_j^2 a_{1j} + R_j^2 a_{2j}}} \frac{[n_{oj} a n_{\epsilon\sigma} (1+2s_j)]^{0.73}}{J_o^{0.18} s_j^{0.73}}$$

**M23/E35**

$$\text{Όπου: } s_j = \frac{d_r}{d_1}$$

$$J_o = 5.67 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{F_r (1+s_j)}{l z d_1 s_j} \right]^{1/2}$$

 $\lambda_j$ 

Λόγος πάχους λιπαντικού και μέσης  
τραχύτητας επιφάνειας

 $d_r$ 

Διάμετρος κυλίνδρου

 $d_1$ 

Διάμετρος αύλακος

 $n_{oj}$ 

Ιξώδες

 $n_{\epsilon\sigma}$ 

Συχνότητα περιστροφής του εσωτερικού  
δακτυλίου

 $F_r$ 

Ακτινικό φορτίο στο έδρανο

 $l$ 

Ουσιαστικό μήκος επαφής του  
κυλίνδρου με τον αύλακα

 $z$ 

Αριθμός κυλίνδρων

 $\alpha_{pc}$ 

Piezo-coefficient



$$65. W = (Xk_v F_r + YF_u)k_{saf}k_f$$

**M24/E36**

Όπου: W

Ισοδύναμο φορτίο

X

Ακτινικός παράγοντας φορτίου

Y

Αξονικός παράγοντας φορτίου

$k_v$

Παράγοντας περιστροφής

$F_r$

Ακτινικό φορτίο

$F_u$

Αξονικό φορτίο

$k_{saf}$

Παράγοντας ασφαλείας

$k_f$

Παράγοντας θερμοκρασίας

$$66. L = \left( \frac{C_j}{W} \right)^{P_j} \quad \text{ή} \quad L_h = \frac{10^6 L}{60n_j}$$

**A32/E37**

Όπου: L

Ζωή σε εκατομμύρια περιστροφές

$L_h$

Ζωή σε ώρες

$C_j$

Δυναμικό φορτίο

W

Ισοδύναμο φορτίο

$P_j$

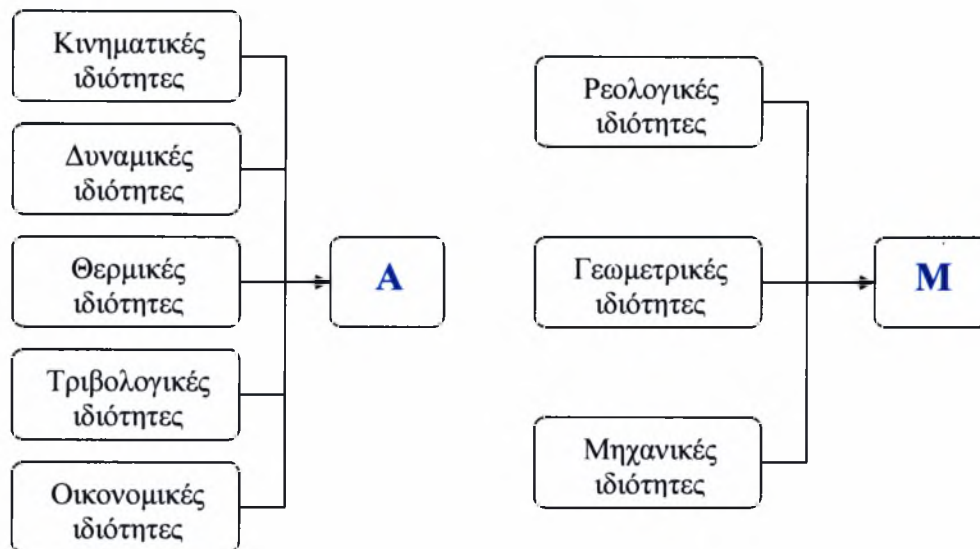
Σταθερά ( $P_j=3$  για σφαιρικά και  $P_j=10/3$  για κυλινδρικά έδρανα)

### 3.1.6 Δεύτερη φάση: Ομαδοποίηση συναρτήσεων και διαμελισμός

Εφόσον έχουμε συγκεντρώσει τις συναρτήσεις που περιγράφουν το σύστημα προχωρούμε αρχικά στην καταγραφή τους σε πίνακα όπου θα περιέχονται και οι εξαρτημένες μεταβλητές. Για την εύκολη αναφορά των συναρτήσεων γίνεται χρήση των κωδικών που έχουν δοθεί στις συναρτήσεις και είναι σημειωμένοι με γραμματοσειρά χρώματος μπλε δίπλα από κάθε συνάρτηση. Σε αυτό το σημείο πρέπει να διευκρινίσουμε ότι αρχικά θα χρησιμοποιήσουμε τον πρώτο από τους δύο κωδικούς που αντιστοιχούν σε κάθε συνάρτηση. Ο δεύτερος κωδικός θα χρησιμοποιηθεί αργότερα όταν θα εφαρμόσουμε τη μέθοδο με άλλα κριτήρια.

Όλοι οι πίνακες που περιγράφουν τη μέθοδο βρίσκονται στο παράρτημα της εργασίας. Στην πρώτη στήλη του πίνακα καταγράφουμε τις συναρτήσεις με τον κωδικό τους και στην πρώτη γραμμή τις εξαρτημένες μεταβλητές. Η ανάπτυξη των μεταβλητών και των συναρτήσεων πρέπει να γίνει με κάποιες αρχές. Πρώτον, πρέπει να γίνει μια διάκριση μεταξύ των συναρτήσεων απόδοσης, οι οποίες μεταδίδονται στα υποσυστήματα ιεραρχικής δομής και επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος, και των συναρτήσεων οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη μηχανική ανάλυση των υποσυστημάτων χωρίς να φεύγουν από τα όρια του υποσυστήματος που τις περιέχει. Δεύτερον, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια ονοματολογία που να κάνει το διαχωρισμό των μεταβλητών που προέρχονται από διαφορετικά τμήματα του σχήματος 3.3.

Έτσι, όσον αφορά τις συναρτήσεις του συστήματος τις διακρίνουμε σε εξισώσεις απόδοσης και σε εξισώσεις μηχανικής ανάλυσης. Οι πρώτες έχουν το γράμμα Α στον κωδικό που χρησιμοποιείται για την αναφορά τους και οι δεύτερες το γράμμα Μ. Ως εξισώσεις απόδοσης έχουμε θέσει τις συναρτήσεις που περιγράφουν τριβολογικά χαρακτηριστικά των μερών του συστήματος, όπως η φθορά, συναρτήσεις που περιγράφουν κινηματικές ιδιότητες, επίσης συναρτήσεις που περιγράφουν θερμικές και δυναμικές ιδιότητες και τέλος συναρτήσεις που περιγράφουν τα οικονομικά μεγέθη της διαδικασίας. Ως εξισώσεις μηχανικής ανάλυσης ορίζουμε τις συναρτήσεις που περιγράφουν τις ρεολογικές, γεωμετρικές και μηχανικές ιδιότητες του συστήματος.



Σχήμα 3-8 Διαχωρισμός συναρτήσεων

Στον πίνακα 3.1 φαίνονται όλες οι συναρτήσεις του συστήματος και η σχέση τους με τις μεταβλητές. Ο σκοπός της μεθόδου του διαμελισμού είναι να ομαδοποιηθούν οι συναρτήσεις και οι μεταβλητές με τέτοιο τρόπο ώστε να αναδειχθούν συνδετικές σχέσεις μεταξύ των εξισώσεων. Ο διαχωρισμός που επιλέγουμε στην παρούσα φάση είναι μεταξύ εξισώσεων απόδοσης και μηχανικών εξισώσεων. Σημειώνεται ότι μπορεί να επιλεγεί άλλος τρόπος διαχωρισμού, οπότε τα αποτελέσματα που λαμβάνονται δεν είναι μοναδικά. Επομένως τα δύο κύρια υποσυστήματα που λαμβάνονται στην παρούσα φάση είναι το A και το M, όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 3.6. Παρατηρώντας τον πίνακα 3.2 βλέπουμε ότι υπάρχουν τέσσερις συνδετικές μεταβλητές: η στιγμιαία θερμοκρασία  $T_f$ , ο χρόνος ζωής του κοπτικού εργαλείου  $\Omega$ , το ισοδύναμο φορτίο στα έδρανα κύλισης  $W$  και ο παράγοντας έλξης της μαντοκίνησης  $\psi$ . Αυτές οι τέσσερις μεταβλητές εμφανίζονται και στα δύο υποσυστήματα. Πρέπει να σημειώσουμε σε αυτό το σημείο μια σημαντική παραδοχή που έχουμε κάνει με σκοπό να απλοποιήσουμε το σύστημα και γενικότερα τη διαδικασία που θα ακολουθήσουμε. Έχουμε υποθέσει λοιπόν, ότι ο χρόνος που τίθενται σε λειτουργία τα διάφορα μέρη της εργαλειομηχανής, ο οποίος εμφανίζεται συνήθως στις εξισώσεις φθοράς, ισούται με το χρόνο κοπής. Από φυσικής άποψης μπορούμε να πούμε ότι μία τέτοια παραδοχή ευσταθεί για ορισμένες κατεργασίες κοπής.

Οι δύο στήλες που εμφανίζονται στα δεξιά του πίνακα 3.3 δείχνουν τον παράγοντα συνδετικότητας με τις συνδετικές μεταβλητές για κάθε συνάρτηση. Ο βαθμός

συνδετικότητας καταδεικνύει την άμεση και έμμεση σχέση μιας συνάρτησης με τις συνδετικές μεταβλητές. Ο βαθμός συνδετικότητας A για μια συνάρτηση θεωρείται, όταν η συνδετική μεταβλητή περιέχεται στην ίδια τη συνάρτηση, ενώ ο βαθμός συνδετικότητας B θεωρείται, όταν η συνάρτηση σχετίζεται με τη συνδετική μεταβλητή μέσω μιας άλλης συνάρτησης. Ως παράδειγμα βαθμού συνδετικότητας A, μπορούμε να αναφέρουμε τη συνάρτηση A39, η οποία συνδέεται άμεσα με τη μεταβλητή  $\psi$ , δηλαδή τον παράγοντα έλξης για την ιμαντοκίνηση, επομένως αποκτά βαθμό συνδετικότητας A ίσο με ένα. Η συνάρτηση A5 περιέχει δύο συνδετικές μεταβλητές: το χρόνο ζωής του κοπτικού εργαλείου  $\Omega$  και τη στιγμιαία θερμοκρασία  $T_f$ . Έτσι η A5 έχει βαθμό συνδετικότητας A με τιμή 2. Ως απλό παράδειγμα βαθμού συνδετικότητας B αναφέρουμε τη συνάρτηση A16, η οποία δε συνδέεται άμεσα με κάποια από τις συνδετικές μεταβλητές. Όμως συνδέεται με τη στιγμιαία θερμοκρασία  $T_f$  μέσω της σχέσεως A1 και εφόσον αυτές οι δύο συναρτήσεις έχουν μία κοινή μεταβλητή, την ταχύτητα κοπής  $V$ , η συνάρτηση A16 έχει βαθμό συνδετικότητας B ίσο με 1. Σε περίπτωση που δεν έχουμε επαρκή αποτελέσματα όσο αφορά τη σημαντικότητα της συνδετικότητας των υποσυστημάτων με τις συνδετικές μεταβλητές, μπορεί να θεωρηθεί ο παράγοντας συνδετικότητας τρίτης τάξης.

Ο βαθμός συνδετικότητας μας βοηθάει στον περαιτέρω διαμελισμό του συστήματος συναρτήσεων και εξισώσεων που έχουμε κατασκευάσει. Από τις πληροφορίες που μας παρέχει ο βαθμός συνδετικότητας για τις συναρτήσεις, επιλέγουμε αυτές που έχουν βαθμό A τουλάχιστον ένα και αυτές που έχουν βαθμό συνδετικότητας B μεγαλύτερο ή ίσο από τρία. Έτσι σχηματίζεται ο πίνακας 3.3. Το κριτήριο επιλογής με βάση τον παράγοντα συνδετικότητας είναι υποκειμενικό. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε τη δημοσίευση των O. Sbaizero, R. Raj, όπου επιλέγονται συναρτήσεις με βαθμό συνδετικότητας A μεγαλύτερο ή ίσο του ένα και βαθμό συνδετικότητας B μεγαλύτερο ή ίσο του 4. Εμείς επιλέγουμε τις συναρτήσεις με βαθμό συνδετικότητας B τουλάχιστον 3, έτσι ώστε να προχωρήσουμε στην ανάλυση που θα κάνουμε με περισσότερες συναρτήσεις και να προκύψουν περισσότερα υποσυστήματα στον περαιτέρω διαμελισμό.

Αναδιαμορφώνοντας τον πίνακα 3.3, αφαιρώντας δηλαδή τις εξαρτημένες μεταβλητές που δεν χρησιμεύουν πλέον για την ανάλυσή μας, παίρνουμε τον πίνακα 3.4 και τελικά τον πίνακα 3.5 με τα τελικά υποσυστήματα που προκύπτουν από την ανάλυση και θα μας χρησιμεύσουν στην ανάλυση απόδοσης του συστήματος. Η μέθοδος με την οποία προέκυψαν τα υποσυστήματα βασίζεται στη φιλοσοφία να

συμπεριλάβουμε όσο το δυνατό περισσότερες συναρτήσεις. Όπως φαίνεται έχει γίνει διάκριση των μεταβλητών σε κινηματικές, τριβολογικές, μεταβλητές που αφορούν τη λίπανση και μεταβλητές απόδοσης. Ο χρόνος  $t$ , είναι μεταβλητή που δεν μπορούμε να την εντάξουμε αμιγώς σε κάποιο επιστημονικό πεδίο. Στην παρούσα φάση και για λόγους που μας βοηθάνε στην ανάλυση που επιχειρούμε, συγκαταλέγουμε το χρόνο στις τριβολογικές μεταβλητές.

### 3.1.7 Ανάλυση απόδοσης

Από την έως τώρα ανάλυση έχουν προκύψει κάποιες ομάδες εξισώσεων. Το επόμενο βήμα είναι να ψάξουμε τις βέλτιστες τιμές, ή τις τιμές εντός των εφικτών φυσικών ορίων για την επίτευξη συγκεκριμένων σχεδιαστικών στόχων. Η ανάλυση μπορεί να έχει φυσική βάση αναλύοντας κάθε υποσύστημα ξεχωριστά και χρησιμοποιώντας τις συνδετικές μεταβλητές για να γενικεύσουμε τα αποτελέσματα του κάθε υποσυστήματος και να καταλήξουμε σε συνολικά αποτελέσματα για το σύστημα κατεργασία - εργαλειομηχανή.

Ο πίνακας 3.5 θα μας οδηγήσει στην ανάλυση. Τα αποτελέσματα των υποσυστημάτων εκφράζονται σε σχέση με τις συνδετικές μεταβλητές ώστε να προκύψουν σχέσεις μεταξύ των υποσυστημάτων οι οποίες θα μας δώσουν μια εκτίμηση για τη συνολική απόδοση του συστήματος.

Από το πρώτο υποσύστημα τροποποιούμε την εξίσωση A9 ως εξής:

$$P = \frac{hV\Omega}{\Omega - t^*} \Rightarrow hV\Omega = P(\Omega - t^*) \Rightarrow V = \frac{P(\Omega - t^*)}{h\Omega} \quad (3.2)$$

Πλέον η A1 με χρήση της 3.2 παίρνει τη μορφή:

$$T_f = T_o + 0.3\mu \left[ \frac{P(\Omega - t^*)}{h\Omega} \right]^{1/2} \left\{ 1023.24 \left[ \frac{P(\Omega - t^*)}{h\Omega} \right]^{-0.183} F^{0.393} DOC^{0.456} \right\}^{0.25} (\pi H_c)^{3/4} (k_c p_c)^{-1/2} \quad (3.3)$$

Έτσι προκύπτει μια νέα σχέση μεταξύ των συνδετικών μεταβλητών  $T_f$  και  $\Omega$  μέσα από σχέσεις του πρώτου υποσυστήματος. Επίσης από την A5 έχουμε ότι:

$$\Omega = \Gamma T_f^{-b}$$

οπότε δε χρειάζεται να ασχοληθούμε περαιτέρω με το υποσύστημα 4.

Συνεχίζοντας την ανάλυση με το υποσύστημα 2 και έχοντας κάνει την παραδοχή ότι ο χρόνος καταπόνησης των μηχανικών μερών της εργαλειομηχανής ισούται με το χρόνο κοπής όπως αυτός έχει οριστεί προκύπτει η εξής μαθηματική ακολουθία. Αρχικά πρέπει να εκφράσουμε την A39 ως προς το χρόνο t. Έτσι έχω:

$$U = I \frac{2\pi}{f_x} R_p \psi \left( 1 + \frac{\psi^2}{3} \right) n_{\mu} t \Rightarrow t = \frac{U}{I \frac{2\pi}{f_x} R_p \psi \left( 1 + \frac{\psi^2}{3} \right) n_{\mu}} \quad (3.4)$$

Η σχέση A7 με χρήση της 3.4 γίνεται:

$$VB = Y_1 t^{x_1 V_1} \Rightarrow VB = Y_1 \left[ \frac{U}{I \frac{2\pi}{f_x} R_p \psi \left( 1 + \frac{\psi^2}{3} \right) n_{\mu}} \right]^{x_1 V_1} \quad (3.5)$$

Πλέον η ανάλυση συνεχίζεται κάθετα από επίπεδο σε επίπεδο. Συνδυάζουμε τις εξισώσεις από κάθε υποσύστημα έτσι ώστε να πάρουμε σχέσεις μεταξύ των συνδεδετικών μεταβλητών. Έτσι συνδυάζοντας τη σχέση 3.5 με τη M11 έχω:

$$V = \frac{C_v \left( \frac{G}{5} \right)^g}{A^{f^*} \left( \frac{\Omega}{60} \right)^n} \quad M11$$

$$VB = Y_1 t^{x_1 V_1} \Rightarrow VB = Y_1 \left[ \frac{U}{I \frac{2\pi}{f_x} R_p \psi \left( 1 + \frac{\psi^2}{3} \right) n_{\mu}} \right]^{x_1 V_1} \Rightarrow$$

$$VB = Y_1 \left[ \frac{U}{I \frac{2\pi}{f_x} R_p \psi \left( 1 + \frac{\psi^2}{3} \right) n_{\mu}} \right]^{x_1 \frac{C_v \left( \frac{G}{5} \right)^g}{A^{f^*} \left( \frac{\Omega}{60} \right)^n}} \quad (3.6)$$

Λαμβάνουμε λοιπόν μία συνάρτηση που σχετίζει τον παράγοντα έλξης  $\psi$ , με τη διάρκεια ζωής του εργαλείου. Συνεχίζοντας με την ίδια τακτική και με απλές αντικαταστάσεις προκύπτει η παρακάτω συνάρτηση που συνδέει τον παράγοντα έλξης για την ιμαντοκίνηση με τη στιγμιαία θερμοκρασία στο κοπτικό εργαλείο. Έτσι έχω:

$$\Omega = \Gamma T_f^{-b}$$

και

$$VB = Y_1 \left[ \frac{U}{I \frac{2\pi}{f_x} R_p \psi \left( 1 + \frac{\psi^2}{3} \right) n_{\mu}} \right]^{x_1 \frac{C_v \left( \frac{G}{5} \right)^g}{A^{f^*} \left( \frac{\Omega}{60} \right)^n}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow VB = Y_1 \left[ \frac{U}{I \frac{2\pi}{f_x} R_p \psi \left( 1 + \frac{\psi^2}{3} \right) n_{\mu}} \right]^{x_1 \frac{C_v \left( \frac{G}{5} \right)^g}{A^{f^*} \left( \frac{\Gamma T_f^{-b}}{60} \right)^n}} \quad (3.7)$$

Ανακεφαλαιώνοντας έχουμε μέχρι στιγμής τις εξής νέες συναρτήσεις:

$$T_f = T_o + 0.3\mu \left[ \frac{P(\Omega - t^*)}{h\Omega} \right]^{1/2} \left\{ 1023.24 \left[ \frac{P(\Omega - t^*)}{h\Omega} \right]^{-0.183} F^{0.393} DOC^{0.456} \right\}^{0.25} (\pi H_c)^{3/4} (k_c P_c)^{-1/2} \quad (3.3)$$

$$VB = Y_1 \left[ \frac{U}{I \frac{2\pi}{f_x} R_p \psi \left( 1 + \frac{\psi^2}{3} \right) n_{\mu}} \right]^{x_1 \frac{C_v \left( \frac{G}{5} \right)^g}{A^{f^*} \left( \frac{\Omega}{60} \right)^n}} \quad (3.6)$$



$$\Rightarrow VB = Y_1 \left[ \frac{U}{I \frac{2\pi}{f_x} R_p \psi \left( 1 + \frac{\psi^2}{3} \right) n_{\mu}} \right]^{x_1 \frac{C_v \left( \frac{G}{5} \right)^g}{A'^* \left( \frac{\Gamma T_f^{-b}}{60} \right)^n}} \quad (3.7)$$

Σε μία δισδιάστατη απεικόνιση, για παράδειγμα της  $\Omega$  με την  $\psi$  θα πρέπει να θεωρήσουμε σταθερές τιμές για την  $T_f$ . Για να προκύψουν τα επιθυμητά διαγράμματα απόδοσης και επομένως οι χρήσιμες σχεδιαστικές βελτιστοποιήσεις θα πρέπει να έχουμε στη διάθεσή μας κάποια πειραματικά δεδομένα που θα μας βοηθήσουν στο σχεδιασμό των γραφικών παραστάσεων. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι σε καμία περίπτωση δεν καταφέραμε να εξαγάγουμε κάποια σχέση που να εμπεριέχει το ισοδύναμο φορτίο  $W$ , που ήταν η τέταρτη συνδετική μεταβλητή. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην αρχική επιλογή των υποσυστημάτων ή στην έλλειψη κάποιας συνάρτησης «κλειδί», η οποία θα μας βοηθούσε να κάνουμε τη σύνδεση με τις άλλες μεταβλητές ή ακόμη στο κριτήριο του βαθμού συνεκτικότητας που μπορεί να απέκλεισε από τη συνέχεια της ανάλυσης κάποιες χρήσιμες συναρτήσεις.

### 3.2 Η μέθοδος διαμελισμού με προεπιλεγμένες συνδετικές μεταβλητές

Σε αυτό το σημείο θα επιχειρήσουμε της επαναπροσέγγιση του προβλήματος εφαρμόζοντας την ίδια μέθοδο, αλλά χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά συνδετικές μεταβλητές που θα έχουμε επιλέξει με κριτήρια εμπειρικά και στηριζόμενοι στη φυσικά αντίληψη του προβλήματος. Επίσης ο διαχωρισμός των συναρτήσεων για τα κύρια υποσυστήματα γίνεται σε συναρτήσεις που περιγράφουν την κατεργασία και σε συναρτήσεις που περιγράφουν την εργαλειομηχανή. Στην παράγραφο 3.1.6 είδαμε ότι οι συνδετικές μεταβλητές, που παίζουν τον πλέον σημαντικό ρόλο στην ανάλυση μη ιεραρχικών συστημάτων, προέκυψαν μέσα από την εφαρμογή της μεθόδου μετά τον καθορισμό των δύο κύριων υποσυστημάτων. Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει, έχουμε επιλέξει κάποιες μεταβλητές που θεωρούμε κρίσιμες για την αξιοπιστία ενός συστήματος, αλλά όπως θα δούμε δεν θα αποκλείσουμε τις συνδετικές μεταβλητές που ενδεχομένως θα προκύψουν μέσα από την εφαρμογή της μεθόδου.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει στη βιβλιογραφική ανασκόπηση οι συνδετικές μεταβλητές είναι δυνατόν να προκύψουν και με τους δύο τρόπους. Αυτό φανερώνει μια ευελιξία της μεθόδου του διαμελισμού ως προς τη μορφή της ανάλυσης. Η επιλογή των συνδετικών μεταβλητών και κατ' επέκταση ο διαχωρισμός των υποσυστημάτων είναι μια αρκετά υποκειμενική διαδικασία, οπότε μπορούν να προκύψουν διαφορετικά αποτελέσματα κατά την ανάλυση του ίδιου συστήματος. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται στην επόμενη παράγραφο. Επίσης διαπιστώνουμε ότι επιλέγοντας εμείς τις συνδετικές μεταβλητές κατά κάποιο τρόπο καθορίζουμε την πορεία που θα ακολουθήσει η ανάλυση, αφού τα σχεδιαγράμματα απόδοσης θα εμπλέκουν άμεσα ή έμμεσα τις επιλεγμένες μεταβλητές. Όμως, υπάρχει και ένα ρίσκο, καθώς είναι πιθανόν οι μεταβλητές που επιλέξαμε να μην έχουν τελικά τόσο συνδετικό χαρακτήρα.

Στο στάδιο της επιλογής των συνδετικών μεταβλητών για το σύστημα κατεργασία εργαλειομηχανή τέθηκαν κριτήρια φυσικά και εμπειρικά. Ακόμη εισάγουμε και την έννοια της στιβαρότητας της εργαλειομηχανής στη θέση κοπής  $K$ . Η στιβαρότητα της εργαλειομηχανής στη θέση κοπής καθορίζεται από εμπειρικούς τύπους και η δύναμη κοπής  $F_y$  είναι ανάλογη της. Επίσης η  $K$  είναι απωστρόφως ανάλογη της τραχύτητας του τεμαχίου. Όμως η σχέση στιβαρότητας και τραχύτητας δεν είναι γραμμική. Στους πίνακες που θα ακολουθήσουν, όπου φαίνεται η πορεία της διαδικασίας διαμελισμού, η στιβαρότητα αντιπροσωπεύεται από τη συνάρτηση  $E38$ . Όπως έχει αποδειχθεί από προηγούμενες μελέτες η στιβαρότητα της εργαλειομηχανής επηρεάζει την ποιοτική απόδοση της κατεργασίας και κατ' επέκταση την οικονομική απόδοση του συστήματος. Επίσης εισάγεται η συνάρτηση  $K16$ , όπου δίνεται ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού, ως επιπλέον μέτρο της απόδοσης της κατεργασίας και κατ' επέκταση του συστήματος κατεργασία-εργαλειομηχανή. Τέλος εισάγεται η συνάρτηση  $K29$  που εκφράζει το χρόνο κοπής  $t_c$ . Αυτό γίνεται διότι στη συγκεκριμένη εξίσωση δίνεται ο χρόνος κοπής συναρτήσει της ταχύτητας πρόωσης  $S$  και μέσω της  $S$  έχουμε μία συσχέτιση του χρόνου κοπής με την ταχύτητα κοπής  $V$ . Αυτό μπορεί να αποδειχθεί σημαντική πληροφορία αφού η ταχύτητα κοπής  $V$  θα επιλεγεί ως συνδετική μεταβλητή.

Όπως είναι γνωστό από τις ήδη υπάρχουσες μελέτες, είναι πολλές οι παράμετροι εκείνες που επηρεάζουν την απόδοση ενός μηχανουργικού συστήματος. Εμείς θα επιλέξουμε για συνδετικές μεταβλητές κάποιες που θεωρούμε ιδιαίτερα κρίσιμες, αλλά και κάποιες που υποθέτουμε ότι παίζουν σημαντικό ρόλο, ώστε να προκύψουν

σχετικές συναρτήσεις απόδοσης. Όπως ήδη αναφέρθηκε επιλέγεται κατ' αρχάς η ταχύτητα κοπής  $V$ . Στην παράγραφο 3.1.6 η ταχύτητα κοπής έπαιξε σημαντικό ρόλο, αν και αυτό δε φαίνεται καθαρά από τους πίνακες της μεθόδου, αφού μέσω αυτής συνδέονταν πολλές συναρτήσεις με τις συνδετικές μεταβλητές με βαθμό συνδετικότητας  $B$ . Επίσης είναι γνωστό ότι η ταχύτητα κοπής επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του μηχανουργικού συστήματος, είτε τα κριτήρια απόδοσης είναι οικονομικά, είτε είναι ποιοτικά.

Δύο ακόμη συνδετικές μεταβλητές που επιλέγονται είναι το πλάτος φθοράς ζώνης  $VB$  και το πλάτος φθοράς κρατήρα  $KT$  για το κεραμικό κοπτικό εργαλείο. Γνωρίζουμε ότι το επίπεδο φθοράς του κοπτικού εργαλείου μπορεί να διαμορφώσει την τελική τραχύτητα του κατεργαζόμενου τεμαχίου και επομένως υπάρχει σύνδεση με τη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου. Όπως φαίνεται από τις εξισώσεις 18 και 19 του Πίνακα Συναρτήσεων το πλάτος φθοράς εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα κοπής και από το χρόνο κοπής.

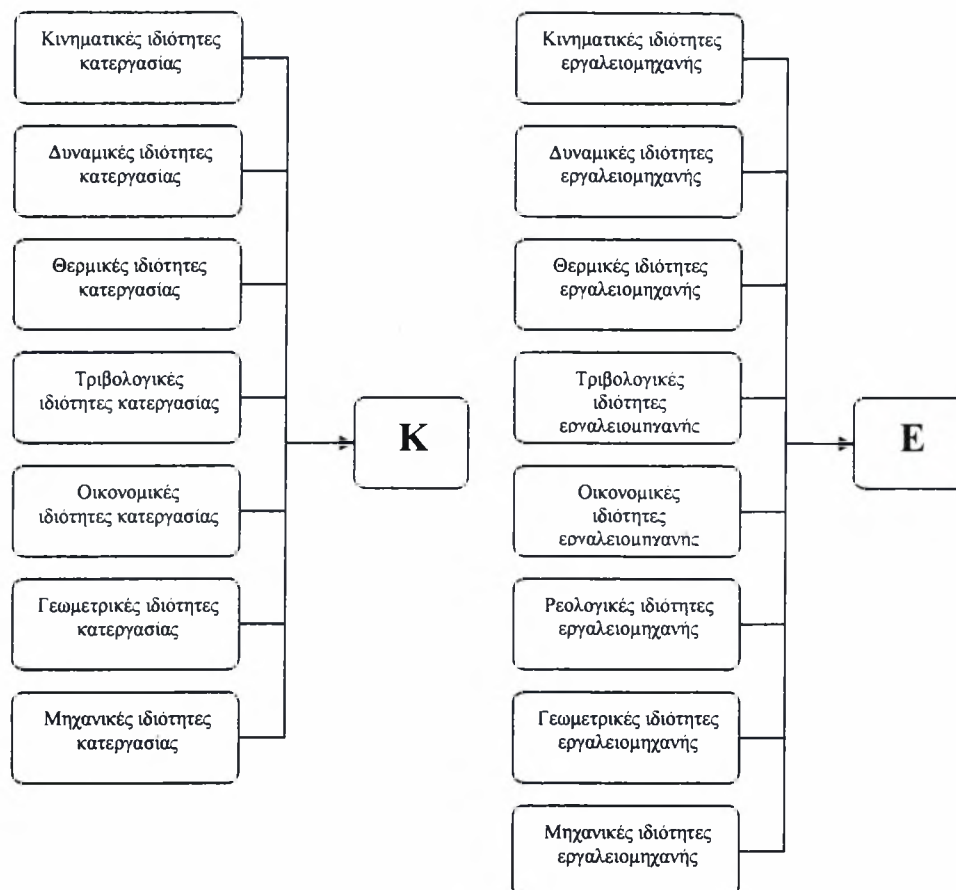
Τέλος επειδή θέλουμε να εξετάσουμε τη συμβολή του λιπαντικού στην απόδοση του συστήματος, εισάγουμε ως συνδετικές μεταβλητές το λόγο του πάχους φιλμ λιπαντικού προς τον ενεργό συντελεστή για κυλινδρικές και ελλειπτικές επαφές  $h/R$  και  $h/R_x$  αντίστοιχα. Από την προηγούμενη ανάλυση δεν προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για το λιπαντικό και με αυτό τον τρόπο επιχειρούμε να κατευθύνουμε τη διαδικασία προς την περιοχή επίδρασης του λιπαντικού.

Ανακεφαλαιώνοντας οι εισαγόμενες συνδετικές μεταβλητές είναι οι εξής:

- Στιβαρότητα,  $K$
- Ταχύτητα κοπής,  $V$
- Πλάτος φθοράς ζώνης,  $VB$
- Πλάτος φθοράς κρατήρα,  $KT$
- Λόγος πάχους φιλμ λιπαντικού προς ενεργό συντελεστή για κυλινδρικές επαφές,  $h/R$
- Λόγος πάχους φιλμ λιπαντικού προς ενεργό συντελεστή για ελλειπτικές επαφές,  $h/R_x$

Στον πίνακα 3.6 παρουσιάζεται η καταγραφή των συσχετίσεων μεταξύ συναρτήσεων και εξαρτημένων μεταβλητών. Οι συναρτήσεις αντιπροσωπεύονται από το δεύτερο κωδικό τους που είναι στα δεξιά κάθε συνάρτησης και με γραμματοσειρά

χρώματος μπλε στον πίνακα των συναρτήσεων. Αυτή τη φορά ο διαχωρισμός των κύριων υποσυστημάτων συναρτήσεων γίνεται όπως στο σχήμα που ακολουθεί.



**Σχήμα 3-9 Διαχωρισμός συναρτήσεων στη δεύτερη εφαρμογή της μεθόδου**

Οι εξαρτημένες μεταβλητές εισήχθησαν με τα ίδια κριτήρια της προηγούμενης ανάλυσης. Η βασική διαφορά είναι ότι αυτή τη φορά υπάρχουν ήδη οι συνδετικές μεταβλητές στο δεξιό μέρος του πίνακα. Για τους παράγοντες συνδετικότητας ισχύουν ακριβώς τα ίδια με την προηγούμενη εφαρμογή. Έτσι οι δύο τελευταίες στήλες του πίνακα 3.7 δίνουν τον παράγοντα συνδετικότητας πρώτου και δευτέρου βαθμού κάθε συνάρτησης με τις μεταβλητές V, KT, VB, K, h/R, h/Rx. Με βάση τον παράγοντα συνδετικότητας προχωράμε στην επόμενη φάση της μεθόδου. Το κριτήριο και πάλι είναι ελάχιστος παράγοντας συνδετικότητας A (ένα) και ελάχιστος παράγοντας συνδετικότητας B (τρία). Έτσι, προκύπτει ο πίνακας 3.8. Από τον πίνακα 3.8 αγνοούμε τις εξαρτημένες μεταβλητές που δεν παίζουν ρόλο στην ανάλυση του

συστήματος και κατασκευάζουμε τον πίνακα 3.9 με τα εναπομείναντα στοιχεία του συστήματος.

Στη συνέχεια, προσπαθώντας να ομαδοποιήσουμε τις συναρτήσεις σε υποσυστήματα διαπιστώνουμε ότι η μεταβλητή  $R_a$  που εκφράζει τη μέση τραχύτητα του τεμαχίου εμφανίζεται σε δύο υποσυστήματα χωρίς να είναι συνδετική μεταβλητή. Επομένως πρέπει να την συγκαταλέξουμε στις συνδετικές μεταβλητές του συστήματος. Αυτή η εξέλιξη προέκυψε καθαρά μέσα από την ανάπτυξη της μεθόδου και θεωρούμε ότι το γεγονός ότι η μέση τραχύτητα δεν είχε επιλεγεί σαν συνδετική μεταβλητή με τα κριτήρια που είχαν καθοριστεί δεν μας απαγορεύει να τη θέσουμε ως μία από τις τελευταίες στην πορεία της μεθόδου. Αυτό πιθανόν να καταδεικνύει μια φυσική πτυχή του προβλήματος που είχαμε παραλείψει. Πάντως στη σπουδαιότητα της  $R_a$  και στην «αναβάθμισή» της συντελούν οι εξισώσεις K14, K15 και E38, δηλαδή η εισαγωγή της έννοιας της στιβαρότητας.

Μια παρόμοια αναβάθμιση προκύπτει και για τη μεταβλητή  $T_f$ , που συμβολίζει τη στιγμιαία θερμοκρασία του κοπτικού εργαλείου. Η στιγμιαία θερμοκρασία είχε προκύψει ως συνδετική μεταβλητή μέσα από την ανάπτυξη της μεθόδου του διαμελισμού στην προηγούμενη εφαρμογή της μεθόδου. Η στιγμιαία θερμοκρασία εξαρτάται από την αλληλεπίδραση της αλλαγής της σκληρότητας του κεραμικού υλικού συναρτήσει της θερμοκρασίας και της επίδρασης της σκληρότητας του υλικού στην παραγόμενη θερμότητα στην επιφάνεια επαφής κατά τη διάρκεια της κοπής.

Συμπεραίνουμε λοιπόν στην πράξη ότι οι συνδετικές μεταβλητές δεν είναι απλά «μαθηματικές γέφυρες» μεταξύ των υποσυστημάτων, αλλά προβάλλουν φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Συνεχίζοντας με την ομαδοποίηση των συναρτήσεων και έχοντας πλέον τη μέση τραχύτητα του τεμαχίου ως συνδετική μεταβλητή, καταλήγουμε στον πίνακα 3.10. Στον τελευταίο πίνακα φαίνονται τα υποσυστήματα που θα μας καθοδηγήσουν στην ανάλυση. Όπως φαίνεται υπάρχουν τρία υποσυστήματα. Το τρίτο εξ αυτών, το οποίο βρίσκεται στην κάτω δεξιά γωνία, αποτελείται από συναρτήσεις που δεν έχουν κοινές μεταβλητές με τις συναρτήσεις των άλλων υποσυστημάτων. Αυτό δε σημαίνει ότι αυτές οι συναρτήσεις δεν είναι σχετικές με το σύστημα. Σημαίνει ότι αυτές οι συναρτήσεις προέκυψαν «ορφανές» και χρειάζεται μια εσκεμμένη και προμελετημένη προσπάθεια για να καθοριστεί ο ρόλος τους στη γενική ανάλυση του συστήματος.

### 3.2.1 Ανάλυση απόδοσης

Σε αυτό το στάδιο θα προσπαθήσουμε να εντοπίσουμε τις τιμές που οδηγούν στην επίτευξη συγκεκριμένων σχεδιαστικών στόχων. Η ανάλυση γίνεται πρώτα ξεχωριστά για κάθε υποσύστημα και με τη χρήση των συνδετικών μεταβλητών για να πάρουμε συγκεντρωτικά γενικά αποτελέσματα για το σύστημα. Τα αποτελέσματα των υποσυστημάτων του πίνακα 3.10 εκφράζονται αρχικά μέσω των συνδετικών μεταβλητών και στη συνέχεια συνδυάζουμε τις εξισώσεις από τα δύο υποσυστήματα για να πάρουμε τις νέες συναρτήσεις μεταξύ των συνδετικών μεταβλητών.

Ξεκινώντας με την ανάλυση του πρώτου υποσυστήματος εκφράζουμε την  $K_{11}$  ως προς  $F_y$  και την εισάγουμε στην E38. Έτσι έχω:

$$K_{11} \rightarrow T_f = T_o + 0.3 \mu V^{\frac{1}{2}} F_y^{0.25} (\pi H_c)^{\frac{3}{4}} (k_c \rho c)^{-\frac{1}{2}} \Rightarrow$$

$$F_y = \sqrt[0.25]{\frac{T_f - T_o}{0.3 \mu V^{\frac{1}{2}} (\pi H_c)^{\frac{3}{4}} (k_c \rho c)^{-\frac{1}{2}}}} \quad (3.8)$$

$$E38 \rightarrow K = Q_k \frac{F_y}{\chi R_a} \Rightarrow K = Q_k \frac{\sqrt[0.25]{\frac{T_f - T_o}{0.3 \mu V^{\frac{1}{2}} (\pi H_c)^{\frac{3}{4}} (k_c \rho c)^{-\frac{1}{2}}}}}{R_a} \quad (3.9)$$

Όπου  $Q_k$  είναι σταθερά που εκφράζει ιδιότητες της εργαλειομηχανής και προκύπτει εμπειρικά,  $\chi$  είναι το διαστατικό σφάλμα. Στον όρο  $Q_k$  εισάγουμε τον παράγοντα συσχέτισης με την τραχύτητα και στη συνέχεια το διαστατικό σφάλμα, για λόγους απλοποίησης.

Οπότε προκύπτει η συνάρτηση (3.9),  $K(T_f, V, R_a)$  και ήδη από την E38 έχουμε την  $K(R_a)$ .

Για να συσχετίσουμε πλάτος φθοράς ζώνης και το πλάτος φθοράς κρατήρα VB και KT αντίστοιχα με τη στιβαρότητα  $K$ , τη στιγμιαία θερμοκρασία  $T_f$  και τη μέση τραχύτητα  $R_a$  θα χρησιμοποιήσουμε την 3.9. Έχω:

$$K = Q_k \frac{\sqrt[0.25]{\frac{T_f - T_o}{0.3 \mu V^{\frac{1}{2}} (\pi H_c)^{\frac{3}{4}} (k_c \rho c)^{-\frac{1}{2}}}}}{R_a} \Rightarrow$$



$$\begin{aligned}
K^{0.25} &= Q_k^{0.25} \frac{\frac{T_f - T_o}{0.3 \mu V^{1/2} (\pi H_c)^{3/4} (k_c pc)^{-1/2}}}{R_a^{0.25}} \Rightarrow \\
K^{0.25} &= \frac{Q_k^{0.25} (T_f - T_o)}{R_a^{0.25} \left[ 0.3 \mu V^{1/2} (\pi H_c)^{3/4} (k_c pc)^{-1/2} \right]} \Rightarrow \\
0.3 \mu V^{1/2} (\pi H_c)^{3/4} (k_c pc)^{-1/2} &= \frac{R_a^{0.25} Q_k^{0.25} (T_f - T_o)}{K^{0.25}} \Rightarrow \\
V &= \sqrt[1/2]{\frac{R_a^{0.25} Q_k^{0.25} (T_f - T_o)}{K^{0.25} 0.3 \mu (\pi H_c)^{3/4} (k_c pc)^{-1/2}}} \quad (3.10)
\end{aligned}$$

Από την K18 έχω:

K18 →  $VB = Y_1 t^{x_1 V_1}$  και με αντικατάσταση του  $V_1$  από την V της 3.10 έχω:

$$VB = Y_1 t \sqrt[1/2]{\frac{R_a^{0.25} Q_k^{0.25} (T_f - T_o)}{K^{0.25} 0.3 \mu (\pi H_c)^{3/4} (k_c pc)^{-1/2}}}^{x_1} \quad (3.11)$$

Ομοίως με αντικατάσταση της 3.10 στην K19 έχω:

K19 →  $KT = Y_2 t^{x_2 V_2} \Rightarrow$

$$KT = Y_2 t \sqrt[1/2]{\frac{R_a^{0.25} Q_k^{0.25} (T_f - T_o)}{K^{0.25} 0.3 \mu (\pi H_c)^{3/4} (k_c pc)^{-1/2}}}^{x_2} \quad (3.12)$$

Επομένως προκύπτουν οι σχέσεις 3.11,  $VB(K, T_f, R_a)$  και 3.12,  $KT(K, T_f, R_a)$ .

Ανακεφαλαιώνοντας βλέπουμε ότι πλέον υπάρχει συσχέτιση μεταξύ όλων των συνδετικών μεταβλητών. Αυτό γίνεται με τις σχέσεις:

$$VB = Y_1 t^{x_1 V_1} \quad K18$$

$$KT = Y_2 t^{x_2 V_2} \quad K19$$

$$K = Q_k \frac{\sqrt[0.25]{\frac{T_f - T_o}{0.3 \mu V^{1/2} (\pi H_c)^{3/4} (k_c pc)^{-1/2}}}}{R_a} \quad (3.9)$$

$$K = Q_k \frac{F_y}{R_a} \quad \text{E38}$$

$$VB = Y_1 t \sqrt[1/2]{\frac{R_a^{0.25} Q_k^{0.25} (T_f - T_o)}{K^{0.25} 0.3 \mu (\pi H_c)^{3/4} (k_c pc)^{-1/2}} x_1} \quad (3.11)$$

$$KT = Y_2 t \sqrt[1/2]{\frac{R_a^{0.25} Q_k^{0.25} (T_f - T_o)}{K^{0.25} 0.3 \mu (\pi H_c)^{3/4} (k_c pc)^{-1/2}} x_2} \quad (3.12)$$

Παρατηρούμε ότι δεν συμπεριλήφθηκαν οι μεταβλητές  $h/R$  και  $h/Rx$  καθώς σχετίζονται μόνο με το τρίτο υποσύστημα, το οποίο όπως έχει ήδη ειπωθεί είναι απομονωμένο και δεν μπορούμε να το συνδέσουμε με τη γενική απόδοση του συστήματος μέσω των άλλων υποσυστημάτων, οπότε κατά συνέπεια οι συνδετικές μεταβλητές που σχετίζονται με το τρίτο υποσύστημα παύουν να είναι συνδετικές. Από φυσικής απόψεως το πάχος του φιλμ λιπαντικού θα έπρεπε να επηρεάζει τη γενική απόδοση του συστήματος. Όμως αυτό δε φαίνεται από την ανάλυση που κάναμε.

Αν παρατηρήσουμε τον πίνακα 3.10 θα δούμε ότι οι συναρτήσεις στις οποίες έχουμε καταλήξει και μέσω των οποίων γίνεται η ανάλυση της απόδοσης του συστήματος, αφορούν στη συντριπτική τους πλειοψηφία συναρτήσεις που περιγράφουν το υποσύστημα της κατεργασίας. Αυτό σε καμία περίπτωση δε σημαίνει ότι η απόδοση των μηχανικών μερών της εργαλειομηχανής είναι άσχετη με την απόδοση του συστήματος. Υπάρχει η ένδειξη ότι κάποιες μεταβλητές που εκφράζουν την αλληλεπίδραση των υποσυστημάτων μπορεί να παραλήφθηκαν από την επιλογή των εξαρτημένων μεταβλητών. Επίσης υπάρχει η πιθανότητα να μη συμπεριλήφθηκε κάποια εξίσωση που αποδίδει την αλληλεπίδραση της εργαλειομηχανής με την κατεργασία, είτε λόγω του κριτηρίου του βαθμού συνδετικότητας, είτε λόγω μη επαρκούς συγκέντρωσης δεδομένων. Πάντως προσωπική εκτίμηση είναι ότι λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος και της έμμεσης φυσικής σχέσης που υπάρχει μεταξύ των παραμέτρων, θα ήταν χρήσιμη η εισαγωγή του βαθμού συνδετικότητας τρίτης τάξης, ώστε να περιέχονται περισσότερες εξισώσεις στην τελική ανάλυση και να μην αποκλείονται σημαντικές πληροφορίες.



### 3.3 Συγκριτική ανασκόπηση

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δύο διαφορετικές προσεγγίσεις του προβλήματος είναι μεν χρήσιμα, όμως η θεωρητική μοντελοποίηση πρέπει να συνοδεύεται πάντα και από πειραματικά δεδομένα ώστε να είναι εφικτή η κατασκευή των διαγραμμάτων απόδοσης. Σε πολλές περιπτώσεις, όπως και στις συναρτήσεις της παραγράφου 3.2.1, ο αριθμός των μεταβλητών και των συναρτήσεων είναι πολύ μεγάλος και δεν είναι δυνατόν να γίνει γραφική ανάλυση. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα υποσυστήματα αναλύονται αριθμητικά για να βελτιστοποιηθούν συγκεκριμένοι σχεδιαστικοί στόχοι και στη συνέχεια συνδέονται τα αποτελέσματα των υποσυστημάτων για την πρόβλεψη της συνολικής απόδοσης.

Γενικά είναι δυνατόν να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία του γραφικού σχεδιασμού διατυπώνοντας το πρόβλημα σε επίπεδο συστήματος και σε επίπεδο υποσυστημάτων ως πρόβλημα μη γραμμικής βελτιστοποίησης. Η διαδικασία της μη γραμμικής βελτιστοποίησης λαμβάνει χώρα σε δύο επίπεδα. Στο χαμηλότερο ή δεύτερο επίπεδο, για κάθε τιμή της συνδετικής μεταβλητής, τα υποσυστήματα βελτιστοποιούνται παράλληλα ή σε σειρά. Η παράλληλη βελτιστοποίηση είναι εφικτή εφόσον τα υποσυστήματα συνδέονται μόνο μέσω των συνδετικών μεταβλητών. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη διαδικασία της μη γραμμικής βελτιστοποίησης υπάρχει πιθανότητα να προκύψουν κάποιες τιμές που δεν είναι αποδεκτές από φυσικής απόψεως

Όσον αφορά τις διαφορές των μεθόδων μπορούμε να πούμε ότι αυτές εντοπίζονται στο στάδιο επιλογής των συνδετικών μεταβλητών. Η προεπιλογή των συνδετικών μεταβλητών αποτελεί παραλλαγή της «απλής» μεθόδου. Με την απλή μέθοδο οι συνδετικές μεταβλητές αναδεικνύονται από τις μαθηματικές πτυχές της διαδικασίας, ενώ θα μπορούσαμε να τις επιλέξουμε με φυσικά και σχεδιαστικά κριτήρια και να καθοδηγήσουμε την ανάλυση. Η επιλογή των υποσυστημάτων είναι μια σχετικά υποκειμενική διαδικασία και δεν εμπίπτει σε περιορισμούς. Έτσι, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα επιλογής των συνδετικών μεταβλητών, το εύρος των αποτελεσμάτων που μπορούμε να πάρουμε είναι τεράστιο.

Όσον αφορά τις τελικές συναρτήσεις που πήραμε από τις δύο μεθόδους δε θα ήταν ασφαλές να κάνουμε κάποια σύγκριση μεταξύ τους, αφού δεν υπάρχουν διαθέσιμα επιστημονικά δεδομένα για να γίνει η διασταύρωση σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο. Η διαδικασία βελτιστοποίησης και σχεδιασμού σε κάθε περίπτωση πρέπει να

είναι εξελικτική και να λαμβάνει πληροφορίες από φαινομενολογικά δεδομένα. Πάντως θα μπορούσαμε να πούμε ότι η επιλογή των συνδετικών μεταβλητών απαιτεί εις βάθος γνώση της φυσικής των μηχανισμών του συστήματος. Υπάρχει βέβαια το πλεονέκτημα της προσανατολισμένης ανάλυσης ως προς τις επιθυμητές μεταβλητές, όμως σε περίπτωση που δεν είμαστε απολύτως σίγουροι ως προς τη γνώση της φυσικής του προβλήματος μπορούμε να προχωρήσουμε με ασφάλεια στην ανάπτυξη της μεθόδου εφόσον έχουμε συγκεντρώσει πλήθος συναρτήσεων ικανό να περιγράψει τη λειτουργία του συστήματος και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υποσυστημάτων. Λέγοντας ότι μπορούμε να προχωρήσουμε με ασφάλεια στην ανάπτυξη της μεθόδου αναφερόμαστε στο ενδεχόμενο αποκλεισμού κάποιας κρίσιμης συνάρτησης από την τελική ανάλυση του συστήματος.

## Κεφάλαιο 4

### 4.1 Εισαγωγή

Εφόσον έχουμε καταλήξει σε κάποια θεωρητικά μαθηματικά μοντέλα από τα οποία θα προκύψουν πληροφορίες χρήσιμες για το σχεδιασμό του συστήματος και στον καθορισμό της αξιοπιστίας του, θα πρέπει να διασταυρώσουμε τα αποτελέσματα που έχουμε με κάποια πειραματικά δεδομένα. Η διασταύρωση αυτή μπορεί να γίνει με χρήση της γνώσης στο επιστημονικό πεδίο της στατιστικής και μέσω αυτής θα συμπεράνουμε, αν και κατά πόσο είναι σωστό το θεωρητικό μοντέλο που έχουμε προτείνει. Στη συνέχεια με χρήση των πειραματικών δεδομένων και με εισαγωγή τους στις συναρτήσεις που έχουμε εξαγάγει στο προηγούμενο κεφάλαιο θα προκύψουν τα διαγράμματα απόδοσης. Στα διαγράμματα απόδοσης βλέπουμε νέες πληροφορίες καταρχάς για τις συνδυαστικές μεταβλητές και κατ' επέκταση για την απόδοση του συστήματος και για όποια μεταβλητή μας ενδιαφέρει συναρτήσει των συνδυαστικών μεταβλητών, εφόσον υπάρχει τρόπος σύνδεσης με αυτή.

Στην παρούσα φάση δεν ήταν δυνατόν να έχουμε κάποια πειραματικά δεδομένα που θα μπορούσαμε να αναλύσουμε παράλληλα με τις συναρτήσεις που έχουν προκύψει από τη μέθοδο του διαμελισμού. Εντούτοις, θεωρούμε χρήσιμο να μελετήσουμε ένα μεμονωμένο παράδειγμα χρήσης στατιστικών μεθόδων για την προσέγγιση θεωρητικών μαθηματικών μοντέλων από εργαστηριακά πειραματικά δεδομένα. Το παράδειγμα το οποίο θα μελετήσουμε εστιάζεται στον καθορισμό της αξιοπιστίας των κεραμικών κοπτικών εργαλείων βάσει της συγκριτικής ανάλυσης διαφορετικών κατανομών συναρτήσεων. Αυτό που επιχειρούμε σε αυτό το κεφάλαιο είναι η κατασκευή του θεωρητικού μοντέλου μέσα από τα πειραματικά δεδομένα, δηλαδή η αντίστροφη διαδικασία σε σχέση με αυτά που έχουμε κάνει μέχρι στιγμής.

Το κοπτικό εργαλείο αποτελεί μέρος του μηχανουργικού συστήματος που εξετάζουμε. Πιθανή βλάβη στο κοπτικό εργαλείο είναι λογικό να προκαλέσει διακοπή της λειτουργίας όλου του συστήματος. Βασισμένοι στις γνώσεις που έχουμε στη μηχανουργική τεχνολογία και συγκεκριμένα στις κατεργασίες κοπής μετάλλων, μπορούμε να πούμε ότι η εμφάνιση βλάβης στο κοπτικό εργαλείο ενός μηχανουργικού συστήματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι οποίοι διαμορφώνουν ένα περίπλοκο πρόβλημα. Εύκολα συμπεραίνουμε ότι ο χρόνος μέχρι την εμφάνιση βλάβης στο κοπτικό εργαλείο δεν είναι σταθερός, αλλά παίρνει τυχαίες

τιμές, τις οποίες θα προσπαθήσουμε να προβλέψουμε εφαρμόζοντας γνωστές στατιστικές μεθόδους.

Με την εφαρμογή στατιστικών μεθόδων είναι δυνατό να καθορίσουμε τη βέλτιστη θεωρητική κατανομή για την προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων. Οι θεωρητικές κατανομές που συναντώνται συχνότερα είναι οι εξής:

- Εκθετική
- Υπέρ-εκθετική
- Κανονική
- Λογαριθμική κανονική
- Weibull
- Ruleigh
- Γάμα
- Gumball
- 

Η επιλογή θεωρητικής κατανομής γίνεται μέσω των παρακάτω μη παραμετρικών ελέγχων:

- Pearson
- Kolmogorov
- Kolmogorov-Smirnoff
- von Mises

Σκοπός μας είναι:

- ✓ ο καθορισμός της συμπεριφοράς των κεραμικών κοπτικών εργαλείων κατά τη διάρκεια κατεργασίας τόννευσης υλικού αυξημένης σκληρότητας και η δυνατότητα επίτευξης απαιτούμενης ποιότητας της κατεργασμένης επιφάνειας
- ✓ η επιλογή θεωρητικής κατανομής που μπορεί να προσεγγίσει ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα για την εμφάνιση βλάβης σε κεραμικό κοπτικό εργαλείο

Μετά την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας θα μπορούμε να κατανοήσουμε με ποιο τρόπο μπορούν να αξιοποιηθούν τα πειραματικά δεδομένα στην κατασκευή των

διαγραμμάτων απόδοσης και τι είδους μετρήσεις πρέπει να γίνουν ώστε να μπορέσουμε να αναπτύξουμε ένα μαθηματικό μοντέλο με τις κατευθύνσεις που έχουμε εισάγει με τη μέθοδο του διαμελισμού.

## 4.2 Βασικοί δείκτες αξιοπιστίας κοπτικών εργαλείων

Οι βασικοί δείκτες για την αξιοπιστία των μερών μηχανουργικών συστημάτων, εν προκειμένω των κοπτικών εργαλείων, είναι οι εξής:

- Συνάρτηση αξιοπιστίας ή πιθανότητα λειτουργίας χωρίς βλάβες, π.χ. σωστή λειτουργία του συστήματος  $R(t)$
- Συνάρτηση αναξιοπιστίας ή πιθανότητα εμφάνισης βλάβης  $F(t)$
- Συνάρτηση συχνότητας εμφάνισης βλάβης  $f(t)$
- Ρυθμός εμφάνισης βλάβης ή συνάρτηση ένταση βλάβης  $\lambda(t)$

Εφόσον είναι γνωστό ένα εκ των τεσσάρων χαρακτηριστικά αξιοπιστίας που αναφέρθηκαν, είναι εύκολο να καθορίσουμε τα άλλα τρία. Η αξιοπιστία των μερών των συστημάτων χαρακτηρίζεται από αριθμητικές παραμέτρους. Οι πιο σημαντικές από αυτές είναι ο χρόνος λειτουργίας χωρίς βλάβες  $T$  για καθορισμένες πιθανότητες και ο μέσος χρόνος λειτουργίας χωρίς βλάβες ή μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών MTBF ή  $\bar{T}$ . Στο παράδειγμα που εξετάζουμε  $\bar{T}$  είναι ο μέσος χρόνος εργασίας ενός λειτουργικού μέρους μεταξύ διαδοχικών βλαβών και κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες.

Η κατανομή μπορεί να δοθεί ως η κατανομή της συνάρτησης  $F(t)$  που αντιπροσωπεύει την πιθανότητα η βλάβη να εμφανιστεί μέχρι τη χρονική στιγμή  $t$ , π.χ. η πιθανότητα ότι ο χρόνος λειτουργίας χωρίς βλάβες δεν ξεπερνάει μια τιμή  $t$ :

$$F(t) = P\{T \leq t\} \quad (4.1)$$

Είναι προφανές ότι στη χρονική στιγμή  $t = 0$ , έχω  $F(0) = 0$ , και για τη χρονική στιγμή  $t \rightarrow \infty$   $F(t)$  τείνει στο 1,  $F(\infty) = 1$ .

Η πιθανότητα λειτουργίας χωρίς βλάβες ή συνάρτηση αξιοπιστίας είναι συμπληρωματική της συνάρτησης αναξιοπιστίας και μπορεί να δοθεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$R(t) = 1 - F(t) = P\{T \geq t\} \quad (4.2)$$

Η συνάρτηση της συχνότητας εμφάνισης βλάβης υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$f(t) = F'(t) = -R'(t) \quad (4.3)$$

Η συνάρτηση έντασης βλάβης καθορίζεται ως:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (4.4)$$

Οι πειραματικές συναρτήσεις για την αξιοπιστία των κοπτικών εργαλείων δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

- Συνάρτηση αξιοπιστίας:

$$R(t) = P(t) = \frac{n - N(t)}{n} = 1 - \frac{N(t)}{n} = 1 - \frac{N(t)}{n} = \frac{n(t)}{n(t) - N(t)} = \frac{n(t)}{n} \quad (4.5)$$

- Συνάρτηση αναξιοπιστίας:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \frac{n(t)}{n} = \frac{N(t)}{n} \quad (4.6)$$

- Συνάρτηση συχνότητας βλάβης:

$$f(t) = \frac{\Delta n}{n} \quad (4.7)$$

- Ρυθμός βλάβης:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\Delta n}{n - N(t)} \quad (4.8)$$

Όπου:

n	Μέγεθος δείγματος
N(t)	Πλήθος μη σωστών στοιχείων ή στοιχείων με βλάβη ως τη χρονική στιγμή t

$n(t)$	Πλήθος σωστών στοιχείων ή στοιχείων χωρίς βλάβη ως τη χρονική στιγμή $t$
$\Delta n$	Συνολικός χρόνος σύμφωνα με το διάστημα ομάδας πληθυσμού (μεταξύ των ορίων του πληθυσμού)

Οι βασικοί δείκτες αξιοπιστίας για τα κοπτικά εργαλεία που προαναφέραμε είναι χρήσιμοι για τον καθορισμό:

- Των περιόδων αντικατάστασης των κοπτικών εργαλείων κατά τη διάρκεια ενός αυτόματου παραγωγικού κύκλου
- Της κατανάλωσης και των απαραίτητων εξαρτημάτων των κοπτικών εργαλείων για την κατεργασία μιας παρτίδας
- Του βέλτιστου σχεδιασμού για την κατεργασία παρτίδων
- Της ποιότητας των κοπτικών εργαλείων κτλ.

#### **4.3 Αλγόριθμος για τον καθορισμό της αξιοπιστίας κοπτικών εργαλείων**

Η εφαρμογή στατιστικών μεθόδων για τις συναρτήσεις βλάβης των κοπτικών εργαλείων κατά τη φάση πραγματικής χρήσης ή αξιοποίησης μπορεί να καθορίσει το θεωρητικό μοντέλο αξιοπιστίας με έναν από τους εξής δύο τρόπους:

- 1) Καθορισμός της αξιοπιστίας του κοπτικού εργαλείου βάσει κάποιας προκαθορισμένης θεωρητικής κατανομής
- 2) Καθορισμός της αξιοπιστίας του κοπτικού εργαλείου με επιλογή της θεωρητικής κατανομής, η οποία προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα

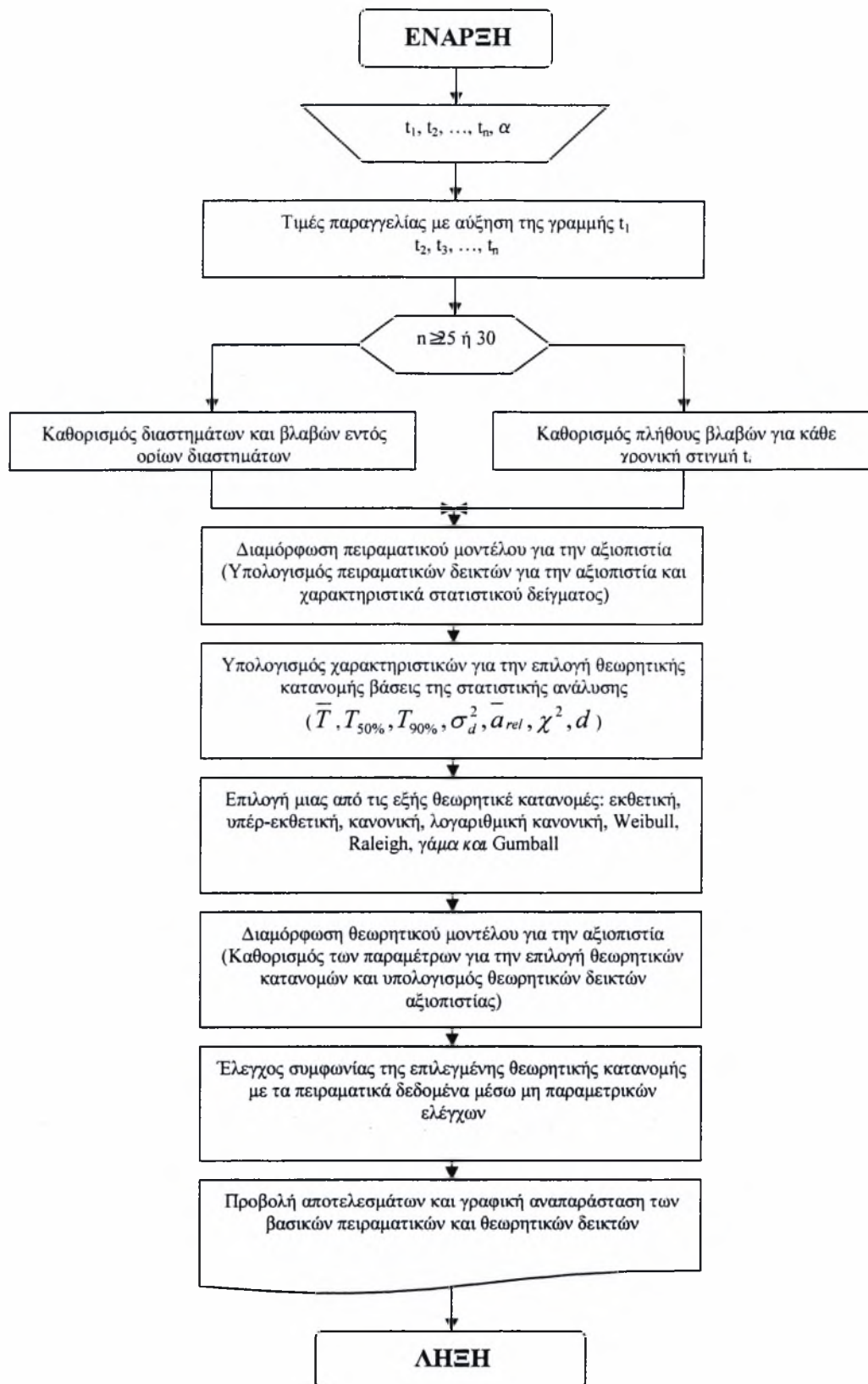
Παρακάτω παρουσιάζεται ο αλγόριθμος για την επιλογή της θεωρητικής κατανομής, η οποία προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα βάσει της συγκριτικής ανάλυσης (σχήμα 4.1).

Τα κύρια στατιστικά χαρακτηριστικά για την επιλογή θεωρητικού μοντέλου κατανομής που θα προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα βάσει της συγκριτικής ανάλυσης είναι:

- Μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών -  $\bar{T}$
- Χρόνος λειτουργίας χωρίς βλάβες για πιθανότητα 90% -  $T_{90\%}$
- Χρόνος λειτουργίας χωρίς βλάβες για πιθανότητα 50% -  $T_{50\%}$
- Διακύμανση θεωρητικής κατανομής -  $\sigma_d^2$
- Μέση τιμή σχετικών σφαλμάτων -  $\bar{a}_{rel}$
- Υπολογισμός της τιμής των  $\chi^2$  και  $\chi_{kr}^2$  για τον μη παραμετρικό έλεγχο Pearson
- Υπολογισμός της τιμής των  $d$  και  $d_{kr}$  για τον μη παραμετρικό έλεγχο Kolmogorov – Smirnov

Οι θεωρητικές κατανομές με τα υψηλότερα  $\bar{T}, T_{50\%}, T_{90\%}$  και τα χαμηλότερα  $\sigma_d^2, \bar{a}_{rel}, \chi^2, d$  θεωρείται ως η κατανομή που προσεγγίζει πιο ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα.





**Σχήμα 4-3 Σχηματική απεικόνιση αλγορίθμου για τον καθορισμό της αξιοπιστίας κοπτικών εργαλείων βάσει της συγκριτικής ανάλυσης**

#### 4.4 Υπόδειγμα ανάλυσης αξιοπιστίας κεραμικών κοπτικών εργαλείων για τόννευση

Στο παράδειγμα που θα ακολουθήσει το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες βιομηχανικής παραγωγής με μέγεθος δείγματος  $n=27$ , υπό τις εξής συνθήκες:

- *Κατεργασία:* εξωτερική διαμήκης τόννευση
- *Υλικό:* χάλυβας C.4721 (σύμφωνα με το πρότυπο JUS) ή 20CrMo5 (σύμφωνα με το πρότυπο DIN) ή 18CD4(S) (σύμφωνα με το πρότυπο AFNOR) σκληρότητας 56-60HRC
- *Εργαλειομηχανή:* universal lathe D-480 (τόρνος)
- *Κοπτικά εργαλεία:* εργαλειοδέτης CCLNR2525M16, ένθετο πλακίδιο πολλαπλών λεπίδων CNGN160812T02020, από κεραμικό κράμα SH1 από την SPK-Feldmühle
- *Ακτίνα ακμής:*  $r=1,2[\text{mm}]$
- *Συνθήκες κατεργασίας:* βάθος κοπής  $a=0.5[\text{mm}]$ , αριθμός περασμάτων  $i=1$ , πρόωση  $S=280[\text{rev/min}]$ , ταχύτητα κοπής  $V=68.61[\text{m/min}]$ , ρυθμός πρόωσης  $F=0.16[\text{mm/rev}]$
- *Μέσος χρόνος κατεργασίας:*  $t_m=0.66964[\text{min}]$
- *Κατεργασία χωρίς ψυκτικά ή λιπαντικά μέσα*

Η παρατήρηση των σφαλμάτων- βλαβών των κοπτικών εργαλείων εξαιτίας της φθοράς έγινε κατά τη διάρκεια της κατεργασίας και το κριτήριο της στόμωσης συνδέθηκε τεχνολογικά με την αλλοίωση της ποιότητας της κατεργασμένης επιφάνειας (η επιθυμητή τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας είναι  $R_a = 0.8[\mu\text{m}]$ ). Οι βλάβες των κεραμικών κοπτικών εργαλείων καταχωρήθηκαν ως συνέπεια πιο δύσκολων συνθηκών κατεργασίας ή κατά τη διάρκεια της αλλαγής του σχήματος της τόννευσης.

Ο χρόνος λειτουργίας χωρίς βλάβες των κεραμικών κοπτικών εργαλείων  $t$  μετρήθηκε σε  $[\text{min}]$  και κυμάνθηκε από  $12,0536[\text{min}]$  ως  $19,4196[\text{min}]$  (Πίνακας 4.1).

Ύστερα από υπολογιστική επεξεργασία των δεδομένων και για καθορισμένες ακραίες χρονικές τιμές λειτουργίας του κοπτικού εργαλείου διαμορφώθηκε το

στατιστικό διάστημα  $12 < t_i \leq 19,5$ , το οποίο βασίζεται στο πλήθος των δεδομένων ( $n=27$ ), χωρισμένο σε  $k=6$  κλάσεις ίσου πλάτους  $\Delta t=1,25$ .

Για τα συγκεκριμένα στατιστικά μεγέθη ( $\Delta t=1,25$ ,  $n=27$ ,  $k=6$ ,  $12 < t_i \leq 19,5$ ) υπολογίζονται οι βασικοί πειραματικοί δείκτες αξιοπιστίας από τις εξισώσεις 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 και παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2.

Τα αριθμητικά χαρακτηριστικά του στατιστικού δείγματος για τα πειραματικά δεδομένα είναι:  $\bar{t}=15.6343[\text{min}]$ ,  $Me=14.8906[\text{min}]$ ,  $Mo=15.125[\text{min}]$ ,  $\sigma=1.6756$ ,  $V=10.7178$ ,  $\beta_1=0.1518$ ,  $\beta_2=2.338$  και  $\gamma_2=-0.662$ .

Όταν  $\bar{t}=15.6343 \approx Me=14.8906 \approx Mo=15.125$ , τότε η πειραματική κατανομή είναι προσεγγιστικά συμμετρική. Όταν  $\beta_1=0.1518$  η πειραματική κατανομή είναι π.χ. αριστερή μη συμμετρική και όταν  $\beta_2=2.338$  ( $\gamma_2=-0.662$ ), τότε η πειραματική κατανομή είναι *ωοειδής* σε σχέση με την κανονική.

Εφόσον το  $\bar{t}=15.6343 \approx Me=14.8906$ , πρέπει να υπολογιστούν οι δείκτες της κανονικής κατανομής. Επίσης, εφόσον αυξάνεται η συνάρτηση έντασης βλάβης  $\lambda(t)$  και  $\bar{t}=15.6343 > \sigma=1.6756$  πρέπει να υπολογιστούν οι δείκτες της κατανομής Weibull και της λογαριθμικής κανονικής κατανομής. Ακόμα πρέπει να υπολογιστούν οι ακραίες τιμές (μέγιστο και ελάχιστο) της κατανομής Gumball. Στη συνέχεια επιλέγεται η θεωρητική συνάρτηση κατανομής που προσεγγίζει πιο ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα βάσει της στατιστικής ανάλυσης των στατιστικών χαρακτηριστικών από τις επιλεγμένες θεωρητικές κατανομές: κανονική, λογαριθμική κανονική, Weibull, κατανομή ελάχιστων τιμών και κατανομή των μέγιστων τιμών.

15,4018	13,3929	14,0625	16,7411	16,7411	18,0803	15,4018	18,75	17,4107
18,0803	14,7321	14,7321	12,7232	14,0625	14,7321	16,0714	16,0714	16,7411
15,4018	13,3929	12,0536	16,0714	19,4196	15,4018	17,4107	14,0625	14,7321

**Πίνακας 4- 6 Χρόνος λειτουργίας [min] χωρίς βλάβες των κεραμικών κοπτικών εργαλείων**

i	Διαστήματα	$t_{mi}$	$\Delta n_e$	$f_e(t)$	$N_e(t)$	$F_e(t)$	$n_e(t)$	$R_e(t)$	$\lambda_e(t)$
1	12.00-13.25	12.625	2	0.0741	2	0.0741	25	0.9529	0.0800
2	13.25-14.50	13.875	5	0.1852	7	0.2593	20	0.7407	0.2500
3	14.50-15.75	15.125	8	0.2963	15	0.5556	12	0.4444	0.6667
4	15.75-17.00	16.375	6	0.2222	21	0.7778	6	0.2222	1.0000
5	17.00-18.25	17.625	4	0.1481	25	0.9259	2	0.7471	2.0000
6	18.25-19.50	18.875	2	0.0741	27	1.0000	0	0.0000	

**Πίνακας 4- 7 Βασικοί δείκτες αξιοπιστίας κεραμικών κοπτικών εργαλείων**

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά με τη χρήση των οποίων επιλέγεται η θεωρητική κατανομή της βλάβης των κοπτικών εργαλείων είναι:

- Παράμετροι των κατανομών και οι βασικές θεωρητικές συναρτήσεις αξιοπιστίας (Πίνακας 4.3)
- Στατιστικά χαρακτηριστικά βάσει των οποίων επιλέγεται η κατάλληλη θεωρητική κατανομή κατόπιν συγκριτικής ανάλυσης των προτεινόμενων κατανομών (Πίνακας 4.4)

Από τον πίνακα 4.4 παρατηρούμε ότι:

- Οι τιμές των  $\bar{T}, T_{50\%}, T_{90\%}$  είναι πολύ κοντά σχεδόν για όλες τις προτεινόμενες θεωρητικές κατανομές
- Η κανονική κατανομή ( $\sigma_d^2 = 3.0057$ ) και η λογαριθμική κανονική κατανομή ( $\sigma_d^2 = 3.0382$ ) έχουν τις ελάχιστες τιμές για το  $\sigma_d^2$
- Η λογαριθμική κανονική κατανομή ( $\bar{a}_{rel} = 1.208\%$ ) και η κανονική κατανομή ( $\bar{a}_{rel} = 3.775\%$ ) έχουν τις ελάχιστες τιμές για το  $\bar{a}_{rel}$
- Η κανονική κατανομή ( $\chi^2 = 2.9147$ ) και η λογαριθμική κανονική κατανομή ( $\chi^2 = 3.6375$ ) έχουν τις ελάχιστες τιμές για το  $\chi^2$
- Η λογαριθμική κανονική κατανομή ( $d=0.0207$ ) καθώς και η κανονική κατανομή ( $d=0.0357$ ) έχουν τα ελάχιστα  $d$ .

i	Τύπος κατανομής	Παράμετροι	Συνάρτηση αξιοπιστίας R(t)	Συνάρτηση σης αναξιοπιστίας F(t)	Συνάρτηση έντασης βλάβης f(t)	Ρυθμός φθοράς λ(t)
1	Κανονική κατανομή	$\mu=15,0383$ $\sigma=1,7337$	$0.5 - \Phi\left(\frac{t-15.0383}{1.7337}\right)$	$1 - R(t)$	$0.287638 \cdot e^{-\frac{(t-15.0383)^2}{6.011431}}$	$\frac{f(t)}{R(t)}$
2	Λογαριθμική κανονική κατανομή	$\mu=1,1742$ $\sigma=0,0502$	$0.5 - \Phi\left(\frac{\log t - 1.174}{0.0502}\right)$	$1 - R(t)$	$\left(\frac{4.314529}{t}\right) \cdot e^{-\frac{(\log t - 1.174)^2}{0.00504008}}$	$\frac{f(t)}{R(t)}$
3	Κατανομή Weibull	$\beta=10,4625$ $n=15,7900$	$e^{-(t/15.79)^{10.4645}}$	$1 - R(t)$	$0.8284 \left(\frac{t}{15.79}\right)^{9.4645} \cdot R(t)$	$\frac{f(t)}{R(t)}$
4	Κατανομή ελάχιστης τιμής	$\mu=15,8799$ $\sigma=1,4445$	$e^{-e^{\left(\frac{t-15.8799}{1.4445}\right)}}$	$1 - R(t)$	$0.865351 \cdot e^{\left(\frac{t-15.8799}{1.4445}\right)} \cdot R(t)$	$\frac{f(t)}{R(t)}$
5	Κατανομή μέγιστης τιμής	$\mu=14,2021$ $\sigma=1,4330$	$1 - e^{-e^{\left(\frac{t-14.2021}{1.433}\right)}}$	$1 - R(t)$	$0.8723 \cdot e^{\left(\frac{t-14.2021}{1.433}\right)} [1 - R(t)]$	$\frac{f(t)}{R(t)}$

**Πίνακας 4-8 Βασικές θεωρητικές συναρτήσεις αξιοπιστίας κεραμικών κοπτικών εργαλείων**

Έτσι βασισμένοι σε αυτή την ανάλυση μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι θεωρητικές συναρτήσεις που έχουν τις υψηλότερες τιμές  $\bar{T}, T_{50\%}, T_{90\%}$  και συγχρόνως τις χαμηλότερες για τα  $\sigma_d^2, \bar{a}_{rel}, \chi^2, d$  είναι η κανονική και η λογαριθμική κανονική κατανομή. Επομένως μπορούμε να επιλέξουμε μία εκ των δύο κατανομών για ανάλυση της αξιοπιστίας των κεραμικών κοπτικών εργαλείων,

Οι ελάχιστες τιμές διακύμανσης θεωρητικής κατανομής  $\sigma_d^2$  και της παραμέτρου  $\chi^2$  εμφανίζονται στην κανονική κατανομή, άρα επιλέγεται ως η κατανομή που θα χρησιμοποιήσουμε στην ανάλυση.

Οι παράμετροι της κανονικής κατανομής υπολογίζονται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων:  $\mu=15.0383$  και  $\sigma=1.7337$ . Με χρήση των παραμέτρων  $\mu$  και  $\sigma$  εξάγονται οι συναρτήσεις των βασικών θεωρητικών δεικτών αξιοπιστίας ως εξής:

- Συνάρτηση αξιοπιστίας:

$$R(t) = 0.5 - \Phi\left(\frac{t - 15.0383}{1.7337}\right) \quad (4.9)$$

- Συνάρτηση αναξιοπιστίας:

$$F(t) = 0.5 + \Phi\left(\frac{t - 15.0383}{1.7337}\right) \quad (4.10)$$

- Συνάρτηση συχνότητας βλάβης:

$$f(t) = 0.287638 \cdot e^{-\frac{(t - 15.0383)^2}{6.011431}} \quad (4.11)$$

- Ρυθμός βλάβης:

$$\lambda(t) = \frac{0.287638 \cdot e^{-\frac{(t - 15.0383)^2}{6.011431}}}{0.5 - \Phi\left(\frac{t - 15.0383}{1.7337}\right)} \quad (4.12)$$



Έλεγχος Pearson για διάστημα εμπιστοσύνης  $\alpha=5\%$ Έλεγχος Kolm-Smirnov  $\alpha=5\%$ 

i	Τύπος κατανομής	$\bar{T}$	$T_{50\%}$	$T_{90\%}$	$\sigma_d^2$	$\bar{a}_{rel}$	r	$\chi^2$	$\chi_{kr}^2$	Αποτέλεσμα	n	d	$d_{kr}$	Αποτέλεσμα
1	Κανονική	15.0383	15.0383	12.8164	3.0057	3.775	1	2.9147	3.841	H υπόθεση είναι δεκτή	27	0.0357	0.2544	H υπόθεση είναι δεκτή
2	Λογαριθμική κανονική	15.0343	14.9343	12.8787	3.0382	1.208	1	3.6375	3.841	H υπόθεση είναι δεκτή	27	0.0207	0.2544	H υπόθεση είναι δεκτή
3	Weibull	15.0218	15.2465	12.7347	3.9426	9.322	1	3.6715	3.841	H υπόθεση είναι δεκτή	27	0.0842	0.2544	H υπόθεση είναι δεκτή
4	Ελάχιστης τιμής	15.0461	15.3504	12.6293	3.4321	12.666	1	4.1426	3.841	H υπόθεση δεν είναι δεκτή	27	0.1082	0.2544	H υπόθεση είναι δεκτή
5	Μέγιστης τιμής	15.0292	14.7273	13.0069	3.3777	9.652	1	6.4371	3.841	H υπόθεση δεν είναι δεκτή	27	0.0376	0.2544	H υπόθεση είναι δεκτή

Πίνακας 4-9 Στατιστικά χαρακτηριστικά των προτεινόμενων θεωρητικών κατανομών

Ο μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών για τη θεωρητική κατανομή είναι  $\bar{T} = 15.0383$  [min]. Η υπόθεση της κανονικής κατανομής γίνεται δεκτή για επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha=5\%$  βάσει των ακόλουθων μη παραμετρικών ελέγχων:

- Έλεγχος Pearson:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\Delta n_e - \Delta n_i)^2}{\Delta n_i} = 2.91467 < \chi_{kr}^2 = 3.841 \quad (4.13)$$

- Έλεγχος Kolmogorov:

$$\lambda = \sqrt{n} D_{\max} = \sqrt{n} \cdot \max |F_e(t) - F_i(t)| = 0.18527 < \lambda_{kr} = 1.358 \quad (4.14)$$

- Έλεγχος Kolmogorov-Smirnov:

$$d = D_{\max} = \max |F_e(t) - F_i(t)| = 0.03566 < d_{kr} = 0.2544 \quad (4.15)$$

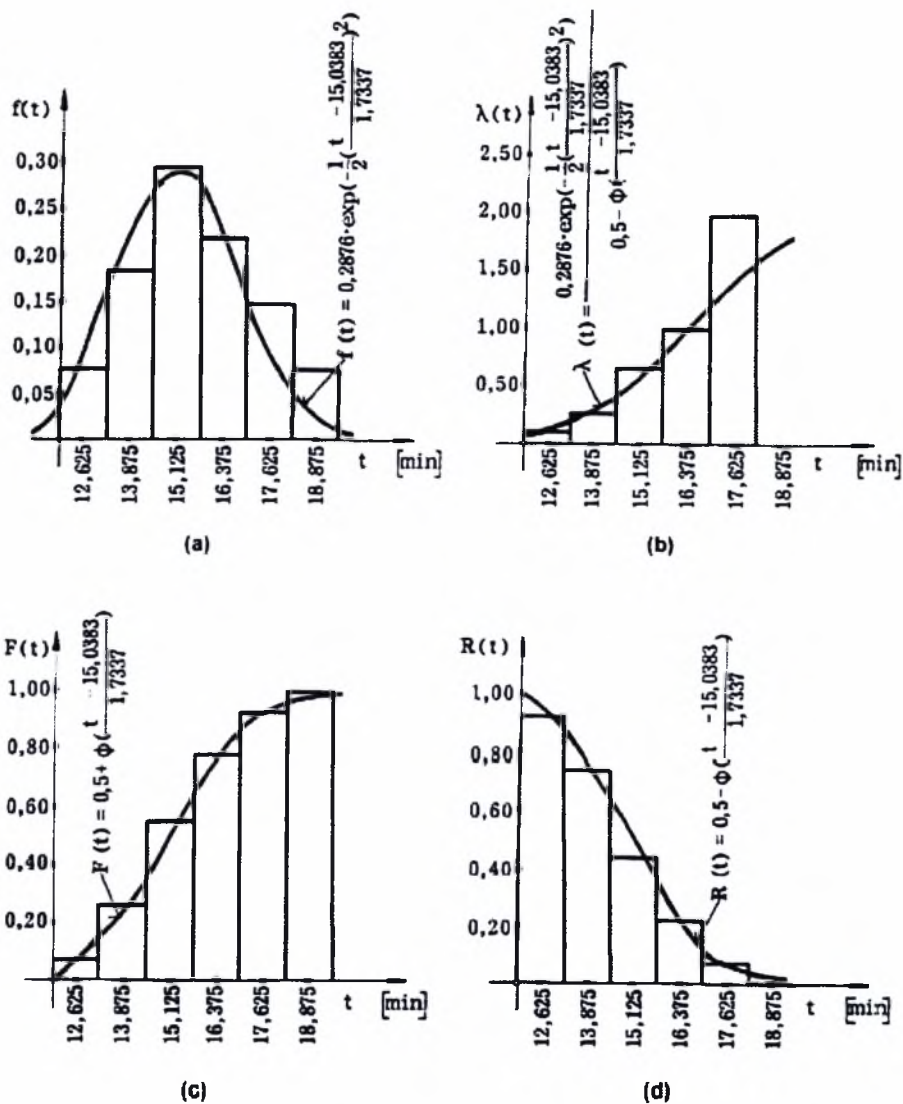
- Έλεγχος Mises:

$$n_{\omega}^2 = \frac{1}{12 \cdot k} + \sum_{i=1}^k \left[ f_i(t) - \frac{i-0.5}{k} \right]^2 = 0.101 < n_{\omega kr}^2 = 0.4614 \quad (4.16)$$

Στο σχήμα 4.2 έχουμε τη γραφική απεικόνιση των βασικών θεωρητικών δεικτών  $f(t), \lambda(t), F(t), R(t)$  του κανονικού μοντέλου αξιοπιστίας με τους πειραματικούς δείκτες, για κεραμικά κοπτικά εργαλεία κατά την τόννευση χάλυβα 20CrMo5.

Οι τιμές των βασικών θεωρητικών δεικτών αξιοπιστίας των κεραμικών κοπτικών εργαλείων  $f(t), \lambda(t), F(t), R(t)$  μπορούν να καθορισθούν με ακρίβεια από το σχήμα 4.2 για οποιαδήποτε χρονική στιγμή λειτουργίας, π.χ. για  $t=15.125$  [min] οι βασικοί θεωρητικοί δείκτες αξιοπιστίας είναι:  $f(15.125)=0.2873\%$ ,  $\lambda(15.125)=0.5984$ ,  $F(15.125)=0.5199\%$  και  $R(15.125)=0.4801\%$ . Στον πίνακα 4.5 παρουσιάζονται οι τιμές των βασικών θεωρητικών δεικτών αξιοπιστίας συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας χωρίς βλάβες για τα καθορισμένα διαστήματα.

Επίσης από το σχήμα 4.2 μπορούμε να προβλέψουμε το χρόνο λειτουργίας χωρίς βλάβες για τα κεραμικά κοπτικά εργαλεία για συγκεκριμένες πιθανότητες, π.χ. για πιθανότητα 80% ο χρόνος λειτουργίας χωρίς βλάβες είναι  $T_{80\%} = 13.5785$  [min] και για πιθανότητα 90% ο χρόνος λειτουργίας χωρίς βλάβες είναι  $T_{90\%}=12.8164$  [min].



Σχήμα 4-4 Γραφική απεικόνιση των κύριων δεικτών αξιοπιστίας των κεραμικών κοπτικών υλικών για το μοντέλο της κανονικής κατανομής

i	Διαστήματα	$t_{mi}$	$\Delta n_i$	$f_i(t)$	$N_i(t)$	$F_i(t)$	$n_i(t)$	$R_i(t)$	$\lambda_i(t)$
1	12.00-13.25	12.625	2.9475	0.1092	2.2221	0.0823	24.7779	0.9177	0.1190
2	13.25-14.50	13.875	6.2007	0.2297	6.7932	0.2516	20.2068	0.7484	0.3069
3	14.50-15.75	15.125	7.7565	0.2873	14.0373	0.5199	12.9627	0.4801	0.5984
4	15.75-17.00	16.375	5.7694	0.2137	21.0438	0.7794	5.9562	0.2206	0.9686
5	17.00-18.25	17.625	2.5517	0.0945	25.1613	0.9319	1.8387	0.0681	1.3878
6	18.25-19.50	18.875	0.6711	0.0249	26.6436	0.9868	0.3564	0.0132	1.8829

Πίνακας 4-10 Βασικοί θεωρητικοί δείκτες αξιοπιστίας κεραμικών κοπτικών υλικών της κανονικής κατανομής



## Κεφάλαιο 5

### Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη της μεθόδου του διαμελισμού και τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το σύστημα κατεργασία- εργαλειομηχανή είναι πολλά και πρέπει να τα ταξινομήσουμε ως προς τη μελέτη, ως προς τα αποτελέσματα της μελέτης για το σύστημα και ως προς τη χρησιμότητα των πειραματικών δεδομένων και ο συνδυασμός τους με τη θεωρία όπως φαίνεται στατιστικά στο κεφάλαιο 4.

#### 5.1 Σχολιασμός της μεθόδου του διαμελισμού (partitioning)

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι να παρουσιάσει μια διαδικασία ανάλυσης του συστήματος σε επίπεδα ή υποσυστήματα που να ενσωματώνει μεταβλητές από όλα τα επιστημονικά πεδία στην τελική ανάλυση του συστήματος. Ουσιαστικά η μέθοδος αναπτύσσεται σε δύο στάδια:

- i. Ομαδοποίηση των μεταβλητών και των συναρτήσεων, ώστε να είναι διακριτή η διαφορετική τους προέλευση όσον αφορά το επιστημονικό πεδίο.
- ii. Στο διαμελισμό του συστήματος σε υποσυστήματα με τοπικές και συνδετικές μεταβλητές.

Ενώ τα υποσυστήματα, που περιγράφονται από τις τοπικές μεταβλητές, μπορούν να αναλυθούν και να βελτιστοποιηθούν παράλληλα, οι συνδετικές μεταβλητές εξυπηρετούν στην ανάλυση της αλληλεπίδρασης και της συσχέτισης μεταξύ των υποσυστημάτων με σκοπό να μελετηθεί η απόδοση του συστήματος ως προς το σύνολό της.

Στην παρούσα εργασία σκοπός μας ήταν καταρχάς να κατανοήσουμε τη μέθοδο του διαμελισμού και στη συνέχεια να την εφαρμόσουμε στο σύστημα κατεργασία-εργαλειομηχανή για να εξάγουμε κάποιες νέες συναρτήσεις που θα περιέχουν μεταβλητές που προηγουμένως δεν συμμετείχαν στις συνολικές εξισώσεις απόδοσης του συστήματος.

Λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος η χρήση υπολογιστικών μεθόδων είναι απαραίτητη για την περαιτέρω ανάλυση του προβλήματος. Οι υπολογιστικές

μέθοδοι μπορούν να αναπτυχθούν με τουλάχιστον δύο σχεδιαστικά αντικείμενα. Ένα αντικείμενο μπορεί να είναι να αποκομίσουμε μια λύση για τις σχεδιαστικές μεταβλητές με σκοπό να επιτύχουμε ένα συγκεκριμένο σχεδιαστικό στόχο. Πάντως, ένα τέτοιο αποτέλεσμα δε θα αποτελούσε μοναδική λύση, αφού υπάρχει η πιθανότητα να οδηγηθούμε σε μια παρόμοια λύση χρησιμοποιώντας διαφορετικό σύνολο σχεδιαστικών μεταβλητών. Το δεύτερο αντικείμενο της υπολογιστικής ανάλυσης μπορεί να είναι η εξέλιξη της ευαισθησίας του συνολικού αποτελέσματος απόδοσης σε διακυμάνσεις των σχεδιαστικών μεταβλητών. Αντιθέτως, με την υπολογιστική ανάλυση η γραφική προσέγγιση του προβλήματος, όποτε αυτή είναι εφικτή, μας δίνει το σύνολο των σχεδιαστικών μεταβλητών που μπορούν να επιφέρουν ένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα ή μια συγκεκριμένη απόδοση.

Σε τελική ανάλυση, μπορούμε να πούμε ότι η μέθοδος του διαμελισμού αποτελεί σημαντικό εργαλείο στην ανάλυση συστημάτων που εμπλέκουν μεταβλητές από διαφορετικά επιστημονικά πεδία και μέσω αυτής μπορούμε να εντοπίσουμε κενά στη γνώση που υπάρχει για την αλληλεπίδραση των μεταβλητών από διαφορετικά επιστημονικά πεδία.

## 5.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όσον αφορά το σχολιασμό των αποτελεσμάτων αξίζει να σταθούμε αρχικά σε μια σημαντική παρατήρηση. Στις δύο εφαρμογές της μεθόδου για το μηχανουργικό σύστημα εισάγαμε πολλές εξισώσεις που περιέχουν παραμέτρους της μικροδομής του κεραμικού κοπτικού εργαλείου. Όπως είναι γνωστό και έχει επισημανθεί στην παρούσα εργασία το κοπτικό εργαλείο αποτελεί ίσως το πιο κρίσιμο μέρος του εξεταζόμενου συστήματος. Παρ' όλα αυτά σε καμία περίπτωση δεν υπάρχουν μεταβλητές που σχετίζονται με τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού του κοπτικού εργαλείου στις συναρτήσεις που προέκυψαν κατά την τελική ανάλυση. Η απάντηση στο ερώτημα γιατί υπάρχει αυτή η έλλειψη, εμφανίζεται στο προσκήνιο από τους πίνακες περιγραφής της μεθόδου διαμελισμού. Βλέπουμε λοιπόν ότι οι συναρτήσεις που περιγράφουν τη μικροδομή και τις ιδιότητες του υλικού του κοπτικού εργαλείου συνδέονται με τις συνδετικές μεταβλητές μόνο μέσω της στιγμιαίας θερμοκρασίας  $T_f$ . Είναι λοιπόν αξιοσημείωτο το γεγονός ότι παρότι έχουν μελετηθεί πολύπλοκοι και εξεζητημένοι μικρομηχανισμοί για τη φθορά σε κεραμικά υλικά δεν υπάρχει πλήρης

κατανόηση της εξάρτησης της σκληρότητας και της απόδοσης του υλικού από τη θερμοκρασία και τη μικροδομή.

Επίσης, θεωρούμε ότι η έλλειψη παραμέτρων της λίπανσης των συνδέσμων της εργαλειομηχανής δεν εξηγείται φυσικά. Μπορούμε να υποθέσουμε πάλι ότι δεν υπάρχουν σχέσεις ικανές να εκφράσουν την αλληλεπίδραση της ποιότητας της λίπανσης με τη συνολική απόδοση του συστήματος. Όμως, αυτή η υπόθεση θα μπορούσε να είναι λανθασμένη. Μετά από μια πιο λεπτομερή εξέταση των εξισώσεων λίπανσης βλέπουμε ότι μπορεί να υπάρξει σύνδεση με τα υπόλοιπα στοιχεία του συστήματος. Αυτό που απαιτείται είναι η εισαγωγή του βαθμού συνδετικότητας τρίτης τάξης. Υπάρχουν διάφορες μεταβλητές που θα μπορούσαν να εξυπηρετήσουν στη συσχέτιση των ρεολογικών φαινομένων με τη συνολική απόδοση του συστήματος και μια από αυτές είναι ο χρόνος. Όμως, μια παραδοχή για το χρόνο όπως η εξίσωσή του με το χρόνο κοπής θα ήταν παρακινδυνευμένη σε αυτή την περίπτωση.

Τα αποτελέσματα από την πρώτη εφαρμογή της μεθόδου ανέδειξαν αρχικά τέσσερις συνδετικές μεταβλητές: τη στιγμιαία θερμοκρασία κοπτικού εργαλείου  $T_j$ , το χρόνο ζωής του κοπτικού εργαλείου  $\Omega$ , το ισοδύναμο φορτίο για τα έδρανα κύλισης  $W$  και τον παράγοντα έλξης για τους ιμάντες  $\psi$ . Τελικά όμως οι συνδετικές μεταβλητές περιορίστηκαν σε τρεις αφού δεν επετεύχθη συσχέτιση του ισοδύναμου φορτίου με τις υπόλοιπες συνδετικές μεταβλητές. Η επίτευξη της συσχέτισης του παράγοντα έλξης με τις άλλες δύο μεταβλητές είναι θα λέγαμε παρακινδυνευμένη αφού στηρίζεται στην παραδοχή ότι ο χρόνος καταπόνησης στην ιμαντοκίνηση της εργαλειομηχανής είναι ίσος με το χρόνο κοπής. Μια τέτοια εκτίμηση όπως η σχέση 3.6 και η 3.7 πρέπει να διασταυρωθεί με πειραματικά δεδομένα για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Πάντως, είναι ευτυχές ότι προέκυψε ένα νέο θεωρητικό μοντέλο από την εφαρμογή της μεθόδου διαμελισμού παρά τις όποιες επιφυλάξεις για την αποτελεσματικότητά του. Από φυσικής απόψεως δεν μπορούμε να αποκλείσουμε κάποια αλληλεπίδραση, έστω και μικρή ως αμελητέα, της απόδοσης του υποσυστήματος της ιμαντοκίνησης με παραμέτρους του κοπτικού εργαλείου και κατά συνέπεια της κατεργασίας, όπως η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου και η στιγμιαία θερμοκρασία. Η θεωρητική έρευνα οφείλει πάντα να εξελίσσεται και να συνδυάζεται με τα εμπειρικά δεδομένα.

Από τη δεύτερη εφαρμογή της μεθόδου ήρθαν στην επιφάνεια κάποιες συνδετικές μεταβλητές τις οποίες είχαμε επιλέξει εμπειρικά. Αυτές ήταν η στιβαρότητα της

εργαλειομηχανής στη θέση κοπής  $K$ , η ταχύτητα κοπής  $V$ , το πλάτος φθοράς ζώνης  $VB$ , το πλάτος φθοράς κρατήρα  $KT$  καθώς και οι συντελεστές  $h/R$  και  $h/Rx$  οι οποίοι σχετίζονται με τη λίπανση των μερών της εργαλειομηχανής. Ακόμη προέκυψαν δύο συνδετικές μεταβλητές μέσα από την εφαρμογή της μεθόδου που δε θα μπορούσαμε να αγνοήσουμε: η στιγμιαία θερμοκρασία  $T_f$  και η μέση τραχύτητα επιφάνειας  $R_a$ . Τελικά όμως οι μεταβλητές  $h/R$  και  $h/Rx$  δεν αποτέλεσαν κομμάτι της τελικής ανάλυσης πιθανότατα για τους λόγους που αναφέραμε προηγουμένως.

Τα καινούρια στοιχεία που προέκυψαν από τη συνολική ανάλυση του συστήματος είναι ότι φαίνεται να υπάρχει σχέση της στιβαρότητας της εργαλειομηχανής με τη στιγμιαία θερμοκρασία  $T_f$  και με την ταχύτητα κοπής  $V$  (σχέση 3.9). Αυτό μπορούμε να πούμε ότι έχει κάποια φυσική βάση και δε μένει παρά να διασταυρωθεί και να ποσοτικοποιηθεί πειραματικά αυτή η συσχέτιση. Επίσης προέκυψαν οι σχέσεις 3.11 και 3.12 που δείχνουν ότι το πλάτος φθοράς ζώνης  $VB$  και το πλάτος φθοράς κρατήρα  $KT$  του κοπτικού εργαλείου εξαρτώνται από τη στιβαρότητα της εργαλειομηχανής  $K$ , τη στιγμιαία θερμοκρασία  $T_f$  και από τη μέση τραχύτητα της επιφάνειας του υπό κατεργασία τεμαχίου  $R_a$ . Δεν υπάρχει λόγος για να απορρίψουμε μια τέτοια υπόθεση. Πρέπει όμως να διασταυρώσουμε το θεωρητικό μοντέλο με δεδομένα που προέρχονται από τη λειτουργία του συστήματος κατεργασία-εργαλειομηχανή. Εφόσον καταφέρουμε να υποστηρίξουμε τις προτεινόμενες συναρτήσεις με πειραματικά δεδομένα θα μπορέσουμε να προχωρήσουμε στη σχεδιαστική βελτιστοποίηση του συστήματος ή τη βελτιστοποίηση της απόδοσής του βάσει των συνδετικών μεταβλητών και των διαγραμμάτων απόδοσης που θα είμαστε σε θέση να κατασκευάσουμε.

### 5.3 Σχολιασμός του στατιστικού υποδείγματος

Στο τέταρτο κεφάλαιο της διπλωματικής παρουσιάζεται ένα παράδειγμα προσδιορισμού της αξιοπιστίας των κεραμικών κοπτικών εργαλείων με στατιστικές μεθόδους. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία και ο στατιστικός έλεγχος υποθέσεων μπορούν να εφαρμοστούν για την ανάλυση της αξιοπιστίας και των άλλων μερών της εργαλειομηχανής. Η συγκριτική ανάλυση διαφορετικών θεωρητικών κατανομών είναι γενικού χαρακτήρα και θα ήταν ενδιαφέρον να δούμε τέτοια αποτελέσματα για τα διάφορα υποσυστήματα που καθορίζονται από τη μέθοδο του διαμελισμού.

Ο σκοπός του υποδείγματος είναι να παρουσιαστεί ένας ενδεχόμενος τρόπος επαλήθευσης του θεωρητικού μοντέλου με στοιχεία που προκύπτουν μέσα από πειραματικές εφαρμογές. Σε περίπτωση που έχουμε κάποια πειραματικά δεδομένα για τις συνδετικές μεταβλητές του συστήματος μπορούμε μέσω των συναρτήσεων της τελικής ανάλυσης να κατασκευάσουμε τα διαγράμματα απόδοσης. Με χρήση των διαγραμμάτων απόδοσης εντοπίζονται οι βέλτιστες τιμές ή βέλτιστα πεδία τιμών για την επίτευξη συγκεκριμένων σχεδιαστικών στόχων.

Επίσης, με χρήση των ίδιων πειραματικών δεδομένων και ακολουθώντας τη μεθοδολογία του κεφαλαίου 4 μπορούμε να προχωρήσουμε στην ανάλυση της απόδοσης και τις αξιοπιστίας αρχικά των υποσυστημάτων και τελικώς του μηχανουργικού συστήματος και να προχωρήσουμε σε σύγκριση με τα διαγράμματα απόδοσης. Λογικά, θα καταλήξουμε στη σύγκριση μιας θεωρητικής κατανομής με μία από τις συναρτήσεις που προέκυψαν από την τελική ανάλυση του κεφαλαίου 4. Έτσι θα μπορούσαμε να συμπεράνουμε αν και κατά πόσο επιτύχαμε τη θεωρητική βελτιστοποίηση του συστήματος δεχόμενοι την ανάδραση των πειραματικών μετρήσεων.

#### **5.4 Αντικείμενα για μελλοντική μελέτη**

Σε αυτή την παράγραφο προτείνουμε κάποιες πτυχές του προβλήματος που μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενα μελλοντικής μελέτης ώστε να εμπλουτιστούν οι γνώσεις μας στα επιστημονικά πεδία που εμπλέκονται στο σύστημα κατεργασία-εργαλειομηχανή και στην απόδοση του συστήματος γενικά. Οι τομείς όπου θεωρούμε πρέπει να υπάρξει μελέτη όπως προκύπτουν μέσα από την εργασία είναι:

- i. Όπως είδαμε προηγουμένως φαίνεται να υπάρχει ένα κενό στις γνώσεις μας όσον αφορά την επίδραση των μικροϊδιοτήτων των υλικών που εμφανίζονται στην κατεργασία, στην απόδοση του συστήματος της κατεργασίας. Υπάρχουν σημαντικές συναρτήσεις που περιγράφουν τους μηχανισμούς με φαινομενολογικό τρόπο κατά τη διάρκεια μιας κατεργασίας όπως η συνάρτηση 11 του πίνακα 3.2. Από τη συγκεκριμένη σχέση φαίνεται η εξάρτηση της στιγμιαίας θερμοκρασίας από τη σκληρότητα. Η μέθοδος του διαμελισμού που εφαρμόσαμε μπορεί να προσφέρει χρήσιμες κατευθυντήριες γραμμές, ώστε να αναπτυχθεί περαιτέρω μια βαθύτερη συσχέτιση μεταξύ της θεμελιώδους έρευνας στον τομέα της επιστήμης των



υλικών και της εφαρμογής της στον καθορισμό της φθοράς του κοπτικού εργαλείου και της αποδοτικότητας της εργαλειομηχανής. Σε γενικές γραμμές, μέσα από τη μέθοδο φαίνεται ότι αυτή η συσχέτιση απαιτεί μια μελέτη της συμπεριφοράς της τοπικής φθοράς κοντά στην επιφάνεια επαφής, όπου οι μεταβολές στη θερμοκρασία είναι μεγάλες.

- ii. Από την ανάλυση που κάναμε δεν καταφέραμε να εξάγουμε συναρτήσεις που να περιλαμβάνουν πολλές παραμέτρους του συστήματος που ίσως να είναι κρίσιμες και δεν υπάρχουν κάποιες ενδείξεις συμμετοχής τους στη συνολική απόδοση του συστήματος. Τέτοιες είναι και οι παράμετροι λίπανσης. Σκοπός της μεθόδου διαμελισμού είναι η χρησιμοποίηση όσο το δυνατό περισσότερων εξισώσεων στην τελική ανάλυση. Η απώλεια αυτών των συναρτήσεων, μαζί και των μεταβλητών που εμπλέκουν πιθανότατα να ενδέχεται στη μη χρησιμοποίηση βαθμού συνδετικότητας τρίτης τάξης. Η επαναπροσέγγιση του προβλήματος με χρήση του τρίτου βαθμού συνδετικότητας θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής μελέτης. Επίσης, σε αυτή τη μελέτη θα μπορούσαν να ενταχθούν πιο πολλές συναρτήσεις που θα περιγράφουν το σύστημα και αν είναι δυνατό όσο πιο λεπτομερή ανάλυση των υποσυστημάτων της εργαλειομηχανής. Βέβαια μια τέτοια μελέτη απαιτεί χρόνο και πόρους και ίσως να μην είναι ρεαλιστικά πραγματοποιήσιμη.
- iii. Ουσιώδες αντικείμενο μελέτης θα αποτελούσε η πειραματική καταγραφή δεδομένων που σχετίζονται με την απόδοση του συστήματος βάσει των συνδετικών μεταβλητών που αναδεικνύονται από τη μέθοδο, ώστε να γίνει διασταύρωση του θεωρητικού μοντέλου και να αναπτυχθούν τα διαγράμματα απόδοσης που θα μας βοηθήσουν στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος. Η διαδικασία της βελτιστοποίησης και του σχεδιασμού πρέπει να είναι εξελεγκτική και να περιλαμβάνει τον αντίκτυπο από εμπειρικά δεδομένα ώστε να αναγνωρίζονται σημαντικές αποκλίσεις από προβλεπόμενους μηχανισμούς.
- iv. Υπάρχουν διάφορες μακροπρόθεσμες εφαρμογές της μεθοδολογίας που παρουσιάζεται από την παρούσα διπλωματική. Οι μεταβλητές και συναρτησιακές συσχετίσεις μπορεί να είναι στοχαστικές. Αυτό θα μας επέτρεπε ανάλυση της ευαισθησίας της απόδοσης ως προς τις σχεδιαστικές παραμέτρους. Αυτή η σχεδιαστική άποψη επαφίεται στην επιστήμη υλικών

από τη στιγμή που υπάρχει συνήθως η ανάγκη αναγνώρισης των πιο σημαντικών παραμέτρων μικροδομής στη συνολική απόδοση του υλικού. Επίσης γνωρίζουμε από την επιστήμη υλικών ότι υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί που μπορούν να επηρεάσουν τη συνολική απόδοση ενός υλικού. Δεδομένης λοιπόν της πολυπλοκότητας και της ποικιλίας των μηχανισμών στη μικροδομή των υλικών, θεωρούμε ότι θα ήταν εξαιρετικά δύσκολο να εφαρμοστεί μια ακριβής προσέγγιση στο σχεδιασμό.

## Βιβλιογραφία

- [1] Douglas, C., Montgomery and George C. Runger “Applied Statistics And Probability For Engineers”
- [2] Γεωργίου Γρ. Ρούσσα «Στατιστική Συμπερασματολογία Τόμος ΙΙ»
- [3] Φ. Κολυβά - Μαχαίρα και Ε.Μπόρα-Σέντα «Στατιστική Θεωρία και Εφαρμογές»
- [4] Πετρόπουλου Π.Γ. «Μηχανουργική Τεχνολογία»
- [5] J.A., Williams “Engineering Tribology”
- [6] Doyle, L.E., Keyser, C.A., Leach, J.L., Schrader, G.F. & Singer, M.B., “Manufacturing Processes and Materials for Engineers
- [7] Ανδρέου-Μποζώνα «Εργαστήριο Ειδικότητας Εργαλειομηχανών
- [8] Kragelsky, I.V. and Alisin V.V. “Friction, Wear, Lubrication, Tribology Handbook I”
- [9] Kragelsky, I.V. and Alisin V.V. “Friction, Wear, Lubrication, Tribology Handbook II”
- [10] Kragelsky, I.V. and Alisin V.V. “Friction, Wear, Lubrication, Tribology Handbook III”
- [11] Kalpakjian, S. & Schmid, S.R., “Manufacturing Processes for Engineering Materials”
- [12] G. Niemann «Στοιχεία Μηχανών Τόμος Ι»



[13] G. Niemann «Στοιχεία Μηχανών Τόμος II»

[14] Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος «Φυσική Μεταλλουργία, Θεμελιώδεις αρχές»

### **Δημοσιεύσεις**

[1] G. Subbarayan, R. Raj “A methodology for integrating materials science with system engineering”

[2] Predrag Dasic “Determination of Reliability of Ceramic Cutting Tools on the Basis of Comparative Analysis of Different Functions Distribution”

[3] O. Sbaizero, R. Raj “System- level Optimization and Design of the High Speed Machining Process Using Ceramic Cutting Tools”

### **Σημειώσεις**

[1] Ν. Βαξεβανίδη «Τεχνολογία Μηχανουργικών Κατεργασιών»

[2] Σ. Αντωνίου «Τριβολογία»

[3] Γ.Πετρόπουλου «Θεωρία Μηχανικών Κατεργασιών»

[4] Κ.Καρατζόγλου «Εισαγωγή στις Μηχανουργικές Κατεργασίες»

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

### **(ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΙΑΜΕΛΙΣΜΟΥ)**

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Οι εξισώσεις του πίνακα συναρτήσεων είναι από:

- [8] Kragelsky, I.V. and Alisin V.V. “Friction, Wear, Lubrication, Tribology Handbook I”
- [9] Kragelsky, I.V. and Alisin V.V. “Friction, Wear, Lubrication, Tribology Handbook II”
- [10] Kragelsky, I.V. and Alisin V.V. “Friction, Wear, Lubrication, Tribology Handbook III”

Εκτός από τις εξισώσεις που αφορούν την κατεργασία:

- [4] Πετρόπουλου Π.Γ. «Μηχανουργική Τεχνολογία»

Οι εξισώσεις για τις μηχανικές ιδιότητες των κεραμικών κοπτικών εργαλείων είναι από:

- [3] O. Sbaizero, R. Raj “System- level Optimization and Design of the High Speed Machining Process Using Ceramic Cutting Tools”

Οι σχέσεις του Κεφαλαίου 2 καθώς και τα σχήματα είναι από:

- [1] Ν. Βαξεβανίδη «Τεχνολογία Μηχανουργικών Κατεργασιών»

Εκτός από σχήμα 2.1:

- [8] Kragelsky, I.V. and Alisin V.V. “Friction, Wear, Lubrication, Tribology Handbook I”

Σχήμα 2.2:

[7] Ανδρέου-Μποζώνα «Εργαστήριο Ειδικότητας Εργαλειομηχανών

Τα σχήματα του Κεφαλαίου 4 είναι από:

[2] Predrag Dasic “Determination of Reliability of Ceramic Cutting Tools on the Basis of Comparative Analysis of Different Functions Distribution”

Οι σχέσεις για το στατιστικό έλεγχο του Κεφαλαίου 4 είναι από:

[2] Γεωργίου Γρ. Ρούσσα «Στατιστική Συμπερασματολογία Τόμος II»

[3] Φ. Κολυβά - Μαχαίρα και Ε.Μπόρα-Σέντα «Στατιστική Θεωρία και Εφαρμογές»



[illegible]





	Fy	VB	KT	P	u	CPF	ST	Pn	L	t	I	U	$\eta_i$	h/R	h/Rx	Tf	$\Omega$	W	$\psi$
A1	X	X														X	X		
A2	X															X	X		
A5																			
A7		X																	
A8		X								X									
A9		X								X									
A11										X									
A12		X								X									
A13																			
A16										X									
A32										X									
A39										X									
M2																X	X		
M3																			
M5																			
M6																			
M8																			
M9																			
M10																			
M11																			
M15																			
M18																			
M21																			
M22																			
M24																			
M25																			

Πίνακας 3.4

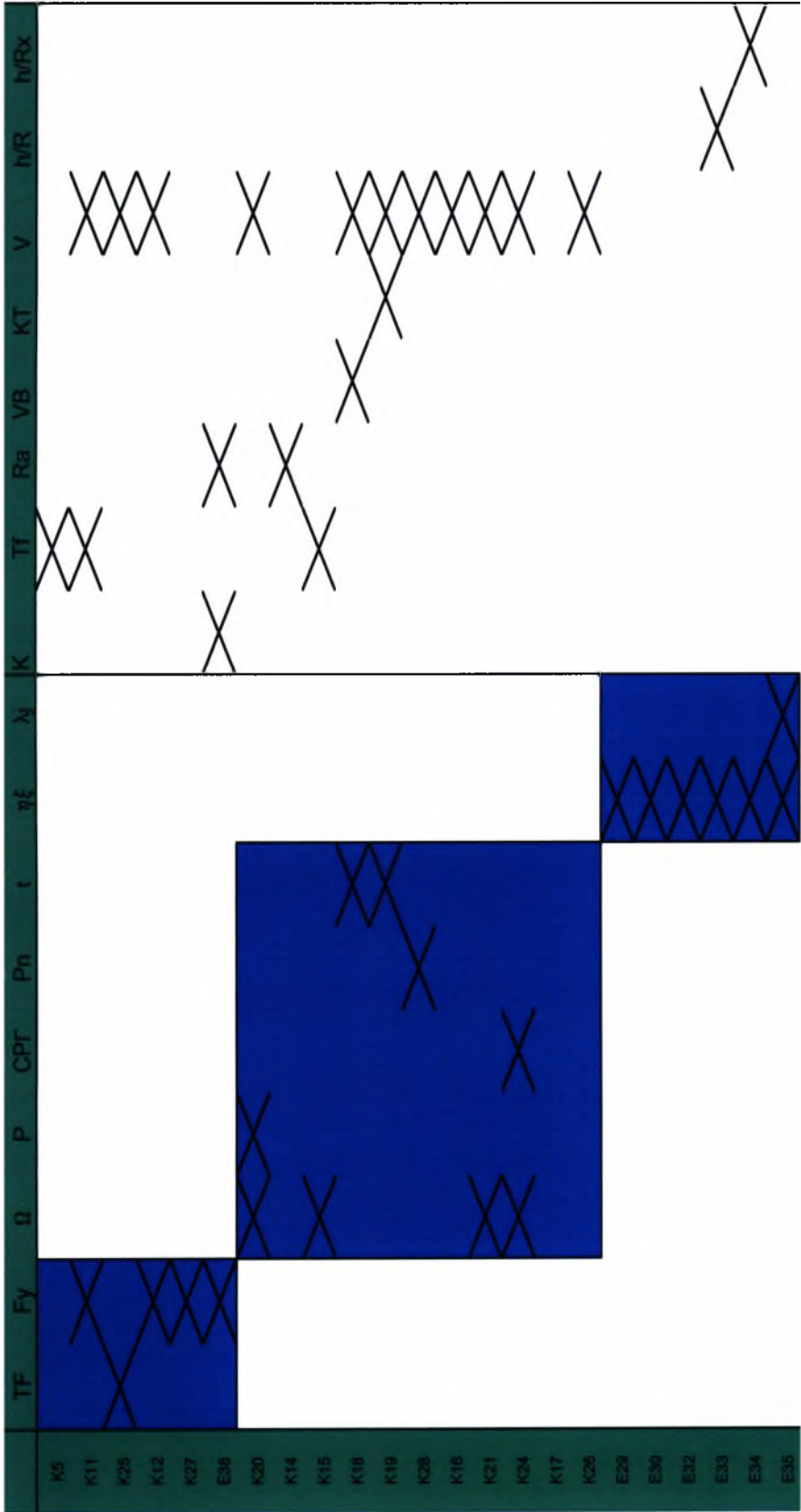
	Κινηματικές	Γραμμικές	Γωνιακές	Παραμορφ.	Ελαστικές	Αντοχές	Αντοχές	Αντοχές	Αντοχές	Αντοχές	Αντοχές	Αντοχές	Αντοχές	Αντοχές	Αντοχές	Αντοχές	Αντοχές	Αντοχές	Αντοχές	Αντοχές
	Fy	P	u	t	VB	KI	I	U	$\eta_k$	h/R	h/Rx	CPI	SI	Ph	L	II	U	W	$\psi$	
A1																				
A2																				
A9																				
A11																				
A7																				
A8																				
A39																				
M18																				
M21																				
M22																				
A5																				
A12																				
A13																				
A16																				
A32																				
M5																				
M8																				
M9																				
M15																				
M11																				
M24																				
M25																				
M2																				
M3																				
M6																				
M10																				

K VB KT V N/R N/R									
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									
32									
33									
34									
35									
36									
37									
38									
39									
40									
41									
42									
43									
44									
45									
46									
47									
48									
49									
50									
51									
52									
53									
54									
55									
56									
57									
58									
59									
60									
61									
62									
63									
64									
65									
66									
67									
68									
69									
70									
71									
72									
73									
74									
75									
76									
77									
78									
79									
80									
81									
82									
83									
84									
85									
86									
87									
88									
89									
90									
91									
92									
93									
94									
95									
96									
97									
98									
99									
100									

	K	VB	KT	V	n/R	n/R	A	B
K1							0	0
K2							0	1
K3							0	1
K4							0	0
K5	X						0	2
K6							0	0
K7	X						0	0
K8	X						0	0
K9	X						0	1
K10	X						0	1
K11	X						1	2
K12	X						1	3
K13							0	2
K14	X						0	3
K15							0	3
K16				X			1	3
K17							0	3
K18							2	1
K19							2	1
K20							1	2
K21							1	2
K22							0	0
K23							0	2
K24	X						1	1
K25							1	2
K26	X						1	1
K27	X						0	3
K28	X						1	2
K29	X						0	2
K30							0	0
E1							0	0
E2							0	0
E3							0	0
E4							0	0
E5							0	0
E6							0	0
E7							0	1
E8							0	0
E9							0	0
E10							0	0
E11							0	0
E12							0	0
E13							0	1
E14							0	0
E15							0	0
E16							0	1
E17							0	0
E18							0	0
E19							0	0
E20							0	1
E21							0	1
E22							0	0
E23							0	0
E24							0	0
E25							0	1
E26							0	1
E27							0	1
E28							0	3
E29							0	3
E30							0	2
E31							0	3
E32							1	3
E33							1	3
E34							0	3
E35							0	0
E36							0	0
E37							1	2



	TT	Fy	Ra	P	u	CPT	TF	ST	Pn	Q	I	ηE	λI	K	VB	KT	V	h/R	h/Rx
K5	X	X															X		
K11	X	X															X		
K12	X	X															X		
K14	X	X	X														X		
K15	X																X		
K16																	X		
K17																	X		
K18																	X		
K19																	X		
K20																	X		
K21																	X		
K24																	X		
K25																	X		
K26																	X		
K27																	X		
K28																	X		
E29																	X		
E30																	X		
E32																	X		
E33																	X		
E34																	X		
E35																	X		
E38																	X		







ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074896

